

Anton Enqvist

**Radiotaajuiset häiriöt ja niiden
tunnistaminen
SMOS-ympäristösatelliitin mittauksista
Suomen alueella**

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 23.4.2012.

Työn valvoja:

Prof. Risto Wichman

Työn ohjaaja:

DI Juha Kainulainen



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Tekijä: Anton Enqvist

Työn nimi: Radiotaajuiset häiriöt ja niiden tunnistaminen
SMOS-ympäristösatelliitin mittauksista Suomen alueella

Päivämäärä: 23.4.2012

Kieli: Suomi

Sivumäärä:8+52

Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos

Professuuri: Signaalinkäsittely

Koodi: S-88

Valvoja: Prof. Risto Wichman

Ohjaaja: DI Juha Kainulainen

SMOS-satelliitti (Soil Moisture and Ocean Salinity) on Euroopan avaruusjärjestö ESA:n hanke, jonka tarkoituksena on mitata maanpäällisiä olosuhteita L-kaistan radiometreillä. Satelliitti käyttää 72 radiometrivastaanotinta tuottaakseen kaksiulotteisia kirkkauslämpötilakarttoja. Usein kuvat ovat kuitenkin monenlaisten radiolähetinlaitteiden aiheuttamien radiotaajuisien häiriöiden (RFI) turmelemia, mikä tekee niistä käyttökelvottomia. Tämä diplomityö selvittää RFI:n vaikutuksia ja läsnäoloa, sekä tutkii useita menetelmiä häiriöiden poistamiseksi. Tutkimus on keskittynyt SMOS-satelliitin aineistoihin mittauksista Suomen alueella.

Avainsanat: Kaukokartoitus, satelliitti, radiometria, interferometrinen radiometri, radiotaajuiset häiriöt

Author: Anton Enqvist

Title: Radio Frequency Interference and its Detection from Measurements of
SMOS Satellite in Finland

Date: 23.4.2012

Language: Finnish

Number of pages:8+52

Department of Signal Processing and Acoustics

Professorship: Signal Processing

Code: S-88

Supervisor: Prof. Risto Wichman

Instructor: M.Sc. (Tech.) Juha Kainulainen

Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) satellite mission is a project of European Space Agency for observing Earth conditions by L-band radiometers. The satellite uses 72 radiometric receivers for synthesizing spatial brightness temperature charts for scientific use. However, frequently the charts are contaminated by Radio Frequency Interference (RFI) caused by various disturbing radio transmitters, thus making the images unusable. This master's thesis studies the effect of RFI, investigates its presence, and tests several methods of reducing its effect. The research is based on SMOS satellite data observed from the area of Finland.

Keywords: Remote sensing, satellite, radiometry, interferometric radiometer, radio frequency interference

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston Sähkötekniikan korkeakoulun Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitokselle. Työn teko ajoittui puolen vuoden työsuhteeseen Radiotieteen ja -tekniikan laitoksen avaruustekniikan laboratoriossa. Diplomityö on osa TEKESin rahoittamaa RFI-projektia.

Kiitän ohjaajaani Juha Kainulaista aktiivisesta ja asiantuntevasta ohjauksesta ja Avaruustekniikan ryhmää mahdollisuudesta työskennellä mielenkiintoisissa tehtävissä. Kiitos myös professori Risto Wichmanille työn valvonnasta.

Otaniemi, 23.4.2011

Anton Enqvist

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
2 Radiometria	3
3 Interferometria	6
3.1 Näkyvyysfunktio	6
3.2 Kuvanmuodostus	8
4 SMOS	11
4.1 SMOS-satelliitti	11
4.2 Polarimetriset tilat	13
4.3 SMOS-datatuotteet	14
4.3.1 L0 - Raakadata	15
4.3.2 L1a - Kalibroidut näkyvyudet	15
4.3.3 L1b - Kirkkauslämpötilat ja kuvanmuodostus	15
4.3.4 L1c - kirkkauslämpötilat maanpinnan koordinaattijärjestel- mässä	16
4.3.5 Korkeamman tason datatuotteet	17
5 Radiotaajuiset häiriöt SMOS-satelliitin mittauksissa	18
5.1 Radiotaajuiset häiriöt maailmanlaajuisesti	20
5.2 Radiotaajuiset häiriöt Suomessa	22
6 Häiriön tunnistus ja poisto	27
6.1 Spliniapproksimaatio	27
6.1.1 Spliniapproksimaation toiminta	29
6.1.2 Painokerroinfunktion valinta	30
6.2 Päällekkäisten kuvien valikointi	32
6.2.1 Kiinteämarginaalinen suodatus splinin avulla	33
6.2.2 Muuttuvamarginaalinen suodatus splinin avulla	33
6.2.3 Mediaanisuodatus	33
6.2.4 Korkeiden antennilämpötilojen leikkaus	34
6.2.5 Kokonaisten kuvien poisto yksittäisistä pikseleistä saadulla in- formaatiolla	34
6.3 Pikselien valikointi	35

6.3.1	Keskihajontaan perustuva valikointi	36
6.3.2	Minimin ja maksimin erotukseen perustuva valikointi	36
7	Tunnistus- ja poistomenetelmien vertailu Suomen alueella	37
7.1	Testiaineisto	37
7.2	Vertailtavat tunnistus- ja poistomenetelmät	37
7.3	Korjauksen hyvyyden tunnusluvut	37
7.3.1	L1c-datan keskimääräinen keskihajonta ja keskiarvo	38
7.3.2	L1c-datan min-max -erotus	38
7.3.3	Peltoemissiomalliin sovitettu keskineliövirhe	39
7.3.4	Meriemissiomalliin sovitettu keskineliövirhe	40
7.4	Vertailun tulokset	40
8	Radiotaajuisten häiriöiden määrä Suomen alueella vuosina 2010 ja 2011	44
9	Yhteenveto	47
	Viitteet	49
	Liite A	51
A	Testeissä käytetyt ylilennot	51
A.1	Vuoden 2010 nousevat ylilennot	51
A.2	Vuoden 2010 laskevat ylilennot	52
A.3	Testiin valikoidut nousevat ylilennot	52
A.4	Testiin valikoidut laskevat ylilennot	52

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

α_k	Splinikerroin
ε_n	Atomin n:s energiatila
(θ, ϕ)	kulma pallokoordinaatistossa
θ^2	Varianssi
λ	Aallonpituus
μ_θ	Keskiarvo
(ξ, η)	Kulmakosinit
Ω	Kulma-avaruus
ω_i	Spliniapproksimaation painokerroin
Ω_t	Avaruuskulma
A_r	Antennin efektiivinen pinta-ala
A_t	Apertuuripinta-ala
B	Säteilyn kirkkaus
B_f	Spektrikirkkaus
b_i	Säteilyn aikasignaali
B_i	Kaistanleveys
c	Valonnopeus
$e(\theta, \phi)$	Emissiivisyys
f	Taajuus
F_n	Antennin suuntaavuus
F_t	Säteilyn intensiteetti
G_i	tehovahvistus
h	Planckin vakio
$H(f)$	Siirtofunktio
k	Aaltoluku
k_B	Boltzmannin vakio
P	Teho
$p(\theta)$	Pienimmän neliösumman polynomiapproksimaatio
R	Antennin etäisyys lähteestä
Δr	Etäisyyksien erotus
\hat{r}_{ij}	Fringe Wash -funktio
\mathcal{S}_k	Splini
s_θ	Keskihajonta
S_t	Säteilyn tehotiheys
$S(t)$	Spliniapproksimaatio
T	Fyysinen lämpötila
T_B	Kirkkauslämpötila
T_{ij}	muunnettu antennilämpötila
V_{ij}	Antennien i ja j näkyvyys

Lyhenteet

CAS	Calibration Subsystem
CCU	Correlator and Control Unit
CNES	Centre National d'Études Spatiales
DGG	Discrete Global Grid
ESA	European Space Agency
HKTM	House Keeping Telemetry
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LICEF	Lightweight Cost-effective Frontend
MIRAS	Microwave Interferometric Radiometer with Aperture Synthesis
NIR	Noise Injection Radiometer
RFI	Radio Frequency Interference
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity

1 Johdanto

Satelliittikaukokartoitus on tärkeä osa nykyajan meteorologiaa ja ilmastontutkimusta. Kaukokartoituksessa kyetään tutkimaan maapallon olosuhteita laaja-alaisesti korkealla sijaitsevan mittauslaitteiston avulla. Laitteistot käyttävät hyväkseen esimerkiksi veden ja muiden aineiden säteilemää sähkömagneettista säteilyä, jonka avulla voidaan saada tärkeää tietoa muun muassa lämpötiloista tai kosteuksista maanpinnalla ja ilmakehässä. Näitä olosuhdetietoja keräämällä saadaan aikaiseksi myös monessa suhteessa tarpeelliset sääennusteet.

Ympäristösatelliittia voidaan kuvailla sen toimintaketjulla. Liikkeelle voidaan lähteä kvanttifysiikasta, joka selittää millä tavalla maanpinnan aineet säteilevät radiosäteilyä. Tämän jälkeen tulee ymmärtää, miten säteily siirtyy sen lähteestä ilmakehän lävitse kohti satelliitin antennoja. Radiotieteen avulla tutkitaan säteilyn tehoa ja sen polarisaatiota. Antennien vastaanottaessa radiosignaalia, osa signaalista on valitettavasti lähtöisin maanpäällisistä häiriölähteistä. Tätä kutsutaan radiotaajuiseksi häiriöksi (Radio Frequency Interference, RFI), joka on tämän diplomityön aiheena.

Satelliitin antennissa säteily muutetaan sähköjohtimissa kulkevaksi sähkövirraksi, jota voidaan vahvistaa ja muuntaa elektroniikkakomponenttien avulla. Tätä vaihetta voidaan tarkastella myös analogisen signaalinkäsittelyn avulla. Sähkösignaali kvantisoidaan satelliitissa ja muunnetaan digitaaliseen muotoon. Jo satelliitissa tarvitaan tietotekniikkaa, jolla digitaaliselle signaalille tehdään laskutoimituksia prosessorien avulla ja signaaleja myös säilötään muisteissa. Tietotekniikka suorittaa vastaanotetulle signaalille digitaalisia signaalinkäsittelyoperaatioita, joiden avulla signaalit muutetaan sellaiseksi dataksi, jota on sopiva siirtää maahan käsiteltäväksi. Tässä siirto-operaatiossa on kyse tietoliikennetekniikasta ja jälleen myös radiotekniikasta, sillä alkukäsitelty data joudutaan siirtämään maahan ilmateitse.

Koska satelliitin rakenteisiin on mahdollista sijoittaa hyvin rajallinen määrä tietotekniikkaa, suurin osa tiedon- ja signaalinkäsittelystä tapahtuu avaruuden sijasta maanpinnalla. Satelliitista saatavasta datasta on vielä hyvin pitkä matka valmiisiin sääennusteisiin. Datan prosessoinnissa suoritetaan raskaita laskentoja perustuen matemaattisiin kaavoihin, jotka on johdettu radiotieteen laeista. Kaukokartoitusprosessi päättyy valmiisiin karttakuviin, jotka kuvaavat riittävällä tarkkuudella maan- tai merenpinnalta tai ilmakehästä mitattavia parametreja. Näitä kuvia voivat esimerkiksi meteorologit hyödyntää työssään.

Koska tämä diplomityö on tehty Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitokselle työsuhteessa Radiotieteen ja -tekniikan laitoksella, työ keskittyy vastaanotettuun radiosignaaliin, signaalinkäsittelyyn ja kirkkauslämpötilakuvanmuodostukseen. Fysikaaliset ilmiöt ja säätiede siis rajataan työn ulkopuolelle.

Tässä työssä tutkitaan radiotaajuista häiriötä SMOS-ympäristösatelliitissa. SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) on Euroopan avaruusjärjestö ESA:n hanke, jonka tarkoituksena on kehittää satelliitti, jonka avulla voidaan kartoittaa maaperän kosteusarvoja sekä valtamerten suolaisuutta. SMOS laukaistiin onnistuneesti maan kiertoradalle vuonna 2009. Satelliitin hyötykuormana on interferometrisen radiometri, joka kykenee mittaamaan kirkkauslämpötilat laajalta maanpinta-

alueelta tarkalla spatiaali- ja kirkkauslämpötilaresoluutiolla. Interferometrinen radiometri on laite, joka kykenee mittaamaan eri suunnista tulevien lämpösäteilyjen kirkkauslämpötila-arvot yhtäaikaaisesti käyttäen useaa samaan suuntaan suunnattua antennia. Itse kuvanmuodostus tapahtuu antennien korrelaatiokertoimilla, jotka siirretään satelliitista maahan ennen kuvanmuodostusprosessia.

Radiotaajuinen häiriö on suuri ongelma kirkkauslämpötilojen laskemisessa. Koska häiriösignaalit ovat huomattavasti maan lämpösäteilyä voimakkaampia, ne saatavat tarvella kuvanmuodostuksessa aikaansaadun kirkkauslämpötilakuvan kokonaisuudessaan. Häiriöt ovat yleensä ihmisten aiheuttamaa; niiden aiheuttajana ovat radiolaitteet. Radiolähettimien lähetysteho on huomattavan suuri verrattuna luontaiseen maan emittoimaan lämpökohinatehoon.

Koska kuvanmuodostus antennien välisistä korrelaatiokertoimista on monitasoinen prosessi, tässä työssä tutkitaan radiotaajuisen häiriön vaikutusta monessa tasossa. Yksinkertaisimmillaan voidaan tutkia yhden radiometrin vastaanottamaa signaalitehoa. Tehon avulla kyetään jo tunnistamaan melko hyvin ajanhetkiä, jolloin tehossa on radiotaajuisen häiriön vaikutuksia. Häiriöiden tunnistusmenetelmiä käytetään myös muodostetuissa kuvissa. Tämä tehdään sekä yksittäisistä yhden ajanhetken kuvissa että kartalle sijoitetuissa kirkkauslämpötilapisteissä. Kartalle sijoitettuja kirkkauslämpötiloja tulee useita päällekkäisiä eri ajanhetkiltä, joten näitä verrataan keskenään.

Tässä työssä esitetään myös tapoja häiriöiden vähentämiseen. Koska satelliitin ottamissa maakaistalekuvissa on paljon päällekkäisyyttä, voidaan tiettyjä huonoimpia kuvia jättää pois, jotta lopputulos olisi parempi. Tässä voidaan käyttää aiemmin esitettyjä häiriöntunnistusmenetelmiä.

2 Radiometria

Tämän diplomityön keskeisimpänä aiheena on radiometria. Radiometria tarkoittaa elektromagneettisen säteilyn energian mittaamista. Radiometriassa säteilyä mittaavaa laitetta kutsutaan radiometriksi. Esimerkiksi kaukokartoituksessa käytettävä radiometri on työkalu, jossa vastaanotin mittaa antennista saatua kohinatehoa tietyllä taajuusalueella. Kohina on tyypillisesti peräisin etäällä olevan kohteen lämpösäteilystä. Päinvastoin kuin radiotietoliikenteessä, kaukokartoituksessa hyötysignaalina on yleensä lämpökohina ja häirtasignaalina elektronisten laitteiden radiotaajuinen säteily. Häiriöillä on toki muitakin lähteitä.

Radiometrian perusteiden ymmärtämiseksi tulee tietää mistä mitattava säteily on peräisin. Maapallon lämpöenergia on lähes kokonaisuudessaan peräisin auringosta. Ilmakehään tullessaan osa auringosta peräisin olevasta sähkömagneettisesta säteilystä heijastuu ilmakehästä takaisin avaruuteen, osa absorboituu ilmakehään ja osa jatkaa kulkuaan kohti mantereita tai meriä. Osa maahan asti selvinneestä säteilystä heijastuu takaisin ilmakehään ja osa imeytyy maahan. Maapallon pintakerros siis absorboi säteilyä, josta seuraa se, että absorboiva aine saa säteilystä lämpöenergiaa. Maan lämpöenergia kasvaisi loputtomasti, mikäli pintakerros ei myös emittoisi säteilyä. Tätä emissiota voidaan hyödyntää kaukokartoituksessa.

Kappaleen säteilyemissiota voidaan tarkastella kvanttimekaniikan kannalta. Yksittäiset atomit eivät voi saada mitä tahansa energiatiloja, vaan ne ovat kvantittuneet energiatiloiksi ε_n . Atomin vaihtaessa energiatilaa tilasta ε_2 tilaan ε_1 , atomi lähettää fotonin taajuudella

$$f = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{h}, \quad (1)$$

jossa h on Planckin vakio. Yksittäisillä atomeilla on siis tiettyjä ominaistajuuksia, jotka voidaan havaita piikkeinä emissiospektreissä. Useista atomeista koostuvien molekyylien tapauksessa energiatilojen määrä moninkertaistuu ja esimerkiksi kiinteiden aineiden ja nesteiden tapauksessa hyvin suurta määrää yhteen sulautuneita piikkejä on spektrissä vaikea erottaa toisistaan, joten on järkevämpää tarkastella kokonaistehoa valitulla taajuuskaistalla. [1]

Musta kappale on sopiva vertailukohta tarkasteltaessa kappaleiden emissiosäteilyä. Musta kappale on ideaalinen kaiken säteilyn täydellisesti absorboiva kappale. Se ei heijasta eikä päästä lävitseen säteilyä. Se myös emittoi kaiken absorboimansa säteilyn. Mustan kappaleen kuvitteellisena esimerkkinä voidaan pitää ontossa kappaleessa olevaa pientä aukkoa. Aukon sisälle päätynyt säteily heijastuu kappaleen sisäpinnalta toiseen monta kertaa, kunnes kaikki säteily on absorboitunut. Aukosta pääsee tällöin ulos vain sisäseinämistä emittoitunut lämpösäteily.

Planckin lain mukaan musta kappale säteilee spektrikirkkaudella (taajuusspektillä)

$$B_f = \frac{2hf^3}{c^2} \left(\frac{1}{e^{hf/k_B T} - 1} \right), \quad (2)$$

jossa f on säteilyspektrin taajuus, c valonnopeus, k_B Boltzmannin vakio ja T mustan kappaleen lämpötila. Spektrikirkkauden yksikkö on $W m^{-2} sr^{-1} Hz^{-1}$. Kun pidetään

mielessä Taylorin approksimaatio

$$e^x - 1 = \left(1 + x + \frac{x^2}{2} + \dots\right) - 1 \approx x, \quad x \ll 1 \quad (3)$$

ja koska $hf/kT \ll 1$, voidaan (2) supistaa muotoon

$$B_f = \frac{2f^2 k_B T}{c^2} = \frac{2k_B T}{\lambda^2}, \quad (4)$$

joka tunnetaan Rayleigh-Jeansin lakina eli Rayleigh-Jeansin approksimaationa. Se pätee mikroaaltoalueella hyvin, mutta taajuuden kasvaessa suureksi arvio heikkenee.

Mikäli lämpösäteilyä vastaanotetaan antennilla, on siirryttävä antenniteorian pariin. Antennin, jonka efektiivinen pinta-ala on A_r , vastaanottaessa riittävän etäältä lähtöisin olevaa säteilyä tehotehokkuutensa S_t , vastaanottama teho on

$$P = S_t A_r. \quad (5)$$

Mikäli lähettimenä on antenni, jonka säteilyintensiteetti on $F_t = S_t R^2$, jossa R on antennin etäisyys, voidaan teho esittää muodossa

$$P = \frac{F_t A_r}{R^2} = B A_r \frac{A_t}{R^2}, \quad (6)$$

jossa B tarkoittaa kirkkautta $B = F_t/A_t$ ja A_t on apertuuripinta-ala. Tämä voidaan edelleen lyhentää muotoon

$$P = B A_r \Omega_t, \quad (7)$$

jossa Ω_t on avaruuskulma.

Tämä oli kuitenkin vain yleistys lähettävän antennin säteillä vakiokirkkaudella tiettyyn suuntaan ja vastaanottoantennin suuntaavuus on lähettävän antennin suunnasta vakio. Todellisuudessa sekä säteilijän kirkkaus $B(\theta, \phi)$ sekä vastaanottavan antennin suuntaavuus $F_n(\theta, \phi)$ riippuvat suunnasta (θ, ϕ) . Differentiaalinen teho differentiaalisessa avaruuskulmaan on tällöin

$$dP = A_r B(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega. \quad (8)$$

Integroimalla tämä teho avaruuskulman yli, saadaan lopulta vastaanotettu kokonaisteho

$$P = \frac{1}{2} A_r \int_f^{f+\Delta f} \iint_{4\pi} B(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega df, \quad (9)$$

jossa kerroin $\frac{1}{2}$ on lisätty sen vuoksi, että vastaanottava antenni vastaanottaa vain yhtä säteilypolarisaatiota. [1]

Yllä esitetyn teorian avulla päästään käsiksi vastaanottotehoon sellaisessa antennissa, joka on sijoitettu mustan kappaleen ympäröimäksi. Tämä käy sijoittamalla Rayleigh-Jeansin approksimaatio (4) kaavaan (9). Tällöin päädytään kaavaan

$$P_{bb} = \frac{1}{2} A_r \int_f^{f+\Delta f} \iint_{4\pi} \frac{2k_B T}{\lambda^2} F_n(\theta, \phi) d\Omega df. \quad (10)$$

Usein radiometriassa taajuuskaista Δf on rajoitettu hyvin pieneksi verrattuna taajuuteen f , joten kaava saadaan yksinkertaistettua muotoon

$$P_{bb} = k_B T \Delta f \frac{A_r}{\lambda^2} \iint_{4\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega. \quad (11)$$

Huomataan, että integraaliosa vastaa antennin kuvioavaruuskulmaa

$$\iint_{4\pi} F_n(\theta, \phi) = \Omega_p = \frac{\lambda^2}{A_r}, \quad (12)$$

jolloin mustan kappaleen sisällä antennin vastaanottama teho on

$$P_n = k_B T \Delta f. \quad (13)$$

Antenniteho on siis suoraan verrannollinen mustan kappaleen lämpötilaan, mikä on tärkeä johtopäätös radiometriassa.

Todellisuudessa kappaleet eivät ole mustia kappaleita. Ne eivät absorboi eivätkä emittoi kaikkea kohtaamaansa säteilyä, vaan heijastavat tai läpäisevät osan siitä. Tällaisia kappaleita sanotaan harmaiksi kappaleiksi. Rayleigh-Jeansin lakia (4) ja siitä joudettua taajuuskaistan kirkkauden kaavaa

$$B_{bb} = \frac{2k_B T}{\lambda^2} \Delta f, \quad (14)$$

kuitenkin käytetään myös käytännössä radiometriassa. Koska säteilevän kappaleen fyysistä lämpötilaa ei pystytä antennitehosta suoraan laskemaan, käytetään radiometriassa suuretta kirkkauslämpötila $T_B(\theta, \phi)$, joka saadaan laskettua kaavasta

$$B(\theta, \phi) = \frac{2k_B}{\lambda^2} T_B(\theta, \phi) \Delta f. \quad (15)$$

Kirkkauslämpötila tarkoittaa antennin vastaanottamaa kirkkautta vastaavaa mustan kappaleen lämpötilaa. Kirkkauslämpötilan T_B suhdetta kappaleen fyysiseen lämpötilaan kutsutaan emissiivisyydeksi

$$e(\theta, \phi) = \frac{B(\theta, \phi)}{B_{bb}} = \frac{T_B(\theta, \phi)}{T}. \quad (16)$$

Emissiivisyys on aina välillä $0 \leq e(\theta, \phi) \leq 1$, eli kappale ei voi olla fyysiseltä lämpötilaltaan lämpimämpi kuin sen kirkkauslämpötila. Emissiokerroin yksi tarkoittaa, että kappale on musta kappale ja nolla tarkoittaa, että se joko läpäisee tai heijastaa kaiken säteilyn. [1]

3 Interferometria

3.1 Näkyvyysfunktio

Kaukokartoituksella on korkeat vaatimukset radiometrille. Kirkkausresoluution lisäksi on myös tärkeää, että radiometri kykenee erottamaan etäällä eri suunnissa olevia kohteita toisistaan. Yksittäisellä pienellä antennilla varustettu radiometri kykenee mittaamaan ympäriltään tulevaa kirkkautta, mutta antennin vastaanottaman signaalin perusteella ei voi juurikaan tehdä johtopäätöksiä kohinan tulosuunnasta.

Apertuuria, esimerkiksi radioantennin peiliä, suurentamalla saadaan antenni suuntaavammaksi. Apertuurin ja radiometrin kulmaresoluution suhdetta kuvaa Rayleigh'n kriteeri,

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{h}, \quad (17)$$

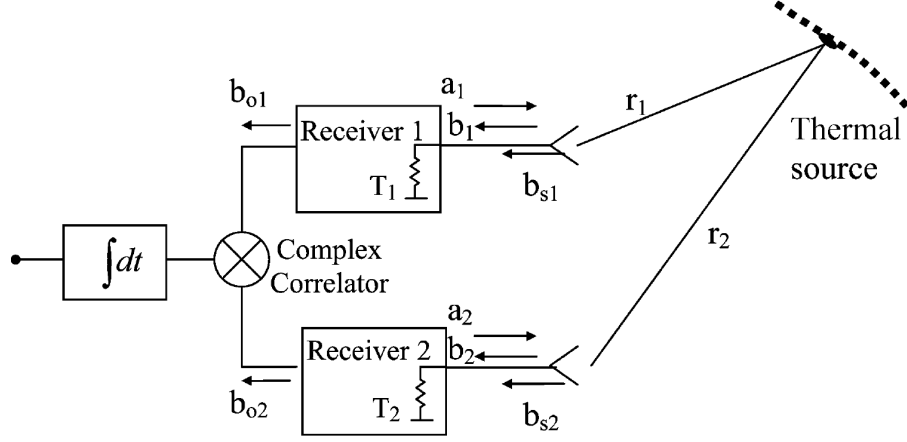
jossa h on apertuurin koko metreinä [2]. Esimerkiksi 750 kilometrin korkeudelta kuvaava SMOS-satelliitti tarvitsisi yli kolmemetrin antenniapertuurin mitataksseen 1400 megahertsin radiosäteilyä vähintään 50 kilometrin resoluutiolla. Tämän kokoluokan antennilautanen on epäkäytännöllinen satelliittikäyttöön. Lisäksi tämä kolmemetrinen antenni pystyisi kuvaamaan kerrallaan vain yhtä aluetta, jonka halkaisija on 50 kilometriä. Kuvien tuottaminen yksittäisistä mittauksista vaatisi joko useita eri suuntiin suunnattuja tämän kokoluokan antennia tai mekaanista sivuttaisliikettä skannatakseen koko alueen spatiaalisesti. Kumpikin näistä vaihtoehdoista on melko epärealistinen, mikäli kyseessä on avaruuteen laukaistava satelliitti.

Kulmaresoluutio- ja kuvantamisongelmiin on kuitenkin yhteinen ratkaisu. Interferometrisellä radiometrillä pystytään kuvaamaan laajan kulman kaikkia suuntia tarkalla spatiaalisella 2D-resoluutiolla yhtäaikaaisesti. Synteettinen apertuuri voidaan toteuttaa esimerkiksi interferometrillä. Interferometrissä on useita antennia muodostelmassa mitattavaan suuntaan nähden kohtisuorassa tasossa. Antennien ei tarvitse olla vahvasti suuntaavia, vaan kulmaresoluutio saavutetaan radiosignaalin vastaanoton jälkeen tapahtuvilla interferometrisillä laskennoilla. Laskennoissa antennista muodostetaan kahden antennin pareja. Käytännössä kaikki antennit ovat pareja kaikkien muiden antennien kanssa, joten N antennin muodostelmassa on $N(N-1)/2$ antenniparia.

Interferometrinen kuvien synteetissä hyödynnetään Fourier-laskentaa antennien välisiin korrelaatiokertoimiin. Jokaiselle antenniparille lasketaan antennien vastaanottamien signaalien korrelaatiota kuvaava kerroin. Tätä kerrointa kutsutaan näkyvydeksi. Antennien i ja j näkyvyys V_{ij} on määritelty seuraavanlaisesti:

$$V_{ij} = \frac{1}{k\sqrt{B_i B_j} \sqrt{G_i G_j}} \frac{1}{2} \langle b_i(t) b_j^*(t) \rangle, \quad (18)$$

jossa k_B on Boltzmannin vakio, B_i on antennin i kohinan kaistanleveys, G_i tehovahvistus. $\frac{1}{2} \langle b_i(t) b_j^*(t) \rangle$ on vastaanotimesta korrelaattoriin saapuvien signaalien ristikorrelaatio. Kuvassa 1 on esitetty interferometrinen antennipari, joiden välinen näkyvyys lasketaan korrelaattorin ja integraattorin avulla.



Kuva 1: Antennipari ja korrelaattori. [3]

Toisaalta, ristikorrelaatiota taajuustasossa vastaava ristispetkritehotiheys on

$$\overline{b_i b_j^*} = \frac{k_B \sqrt{D_i D_j}}{4\pi} \iint_{4\pi} [T_B(\theta, \phi) - T_r] F_i(\theta, \phi) F_j(\theta, \phi) e^{jk\Delta r} d\Omega, \quad (19)$$

jossa D_i on vastaanottimesta mitattu suurin suuntaavuus, $[T_B(\theta, \phi) - T_r]$ suunnasta (θ, ϕ) mitatun kirkkauslämpötilan erotus radiometrien fyysiseen lämpötilaan, k on aaltoluku ja Δr kahden antennin erotus matkassa säteilyn lähteeseen. [3]

Signaalinkäsittelyn kannalta on ongelmallista, mikäli Fourier-muunnos tulisi suorittaa kaksiulotteisen kulman yli. Kulmat voidaan kuitenkin muuntaa kulmakosineiksi

$$\begin{cases} \xi = \sin \theta \cos \phi \\ \eta = \sin \theta \sin \phi, \end{cases} \quad (20)$$

joiden avulla koordinaatit saadaan karteesisiksi. Tällöin aiemmin kaavoissa esiintynyt differentiaalinen avaruuskulmatermi $d\Omega$ voidaan muuntaa muotoon

$$d\Omega = \sin \theta \cos \phi d\theta d\phi = \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}}. \quad (21)$$

Myös erotus Δr voidaan esittää kulmakosinien (ξ, η) ja antennien etäisyyksien $(x_2 - x_1, y_2 - y_1) = (u, v)$ funktiona:

$$\Delta r = r_2 - r_1 \approx -(\xi \Delta x + \eta \Delta y). \quad (22)$$

Lopulta, yhdistämällä kaavat (18) - (22), saadaan kirkkauslämpötilakuvan muodostuksessa tarvittava kaksiulotteisen etäisyyden (u, v) funktiona oleva näkyvyysfunktio

$$V_{ij}(u, v) = \iint_{\xi^2 + \eta^2 \leq 1} T_{ij}(\xi, \eta) \tilde{r}_{ij} \left(-\frac{u\xi + v\eta}{f_0} \right) e^{-j2\pi(u\xi + v\eta)} d\xi d\eta. \quad (23)$$

Funktiossa $\tilde{r}(\tau)$ tarkoittaa antenniparien korrelaation aiheuttamaa Fringe Wash -funktioita

$$\tilde{r}_{ij}(\tau) = \frac{e^{-j2\pi f_0 \tau}}{\sqrt{B_i B_j} \sqrt{G_i G_j}} \int_0^\infty H_i(f) H_j^*(f) e^{j2\pi f_0 \tau} df, \quad (24)$$

jossa

$$B_i = \frac{1}{G_i} \int_0^\infty |H_i(f)|^2 df \quad (25)$$

ja $T_{ij}(\xi, \eta)$ on muunnettu antennilämpötila [3] ja f_0 taajuuskaistan keskitaajuus.

$$T_{ij}(\xi, \eta) = \frac{\sqrt{D_i D_j}}{4\pi} \frac{T_B(\xi, \eta) - T_r}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} F_i(\xi, \eta) F_j^*(\xi, \eta). \quad (26)$$

Näkyvyysfunktio (23) osoittaa, että se riippuu spatiaalisesta kirkkauslämpötilakuvasignaalista $T_{ij}(\xi, \eta)$, joka kuvaa radiometrillä mitattavan maa-alueen kirkkauslämpötilaa. Koska näkyvyysfunktion (23) ja muunnetun antennilämpötilan (26) suhde on Fourier-muunnoksen kaltainen, on kirkkauslämpötilafunktio palautettavissa näkyvyysfunktioista käänteisellä spatiaalisella Fourier-muunnoksella. Tätä toimenpidettä kutsutaan kuvanmuodostukseksi, josta kerrotaan seuraavassa alaluvussa.

3.2 Kuvanmuodostus

Radiometristen karttojen luomista varten täytyy näkyvyysfunktio muuttaa avaruus-kulman tai spatiaalisen tason funktiona olevaan alueeseen. Tämä onnistuu Fourier-synteesillä. Kirkkauslämpötilan ja näkyvyyden suhde on Fourier-muunnos, mikäli $\tilde{r} = 1$ sekä kaikki antennikuviot ovat samanlaiset.

Kun vastaanottimien dekorrelaatiovaikutus on mitätön ja antenneilla on samat jännitespektri, on funktion arvo $\tilde{r} \approx 1$. [4] ja muunnosta voidaan tarkastella Fourier-muunnoksena

$$T(\xi, \eta) = F^{-1}[V(u, v)]. \quad (27)$$

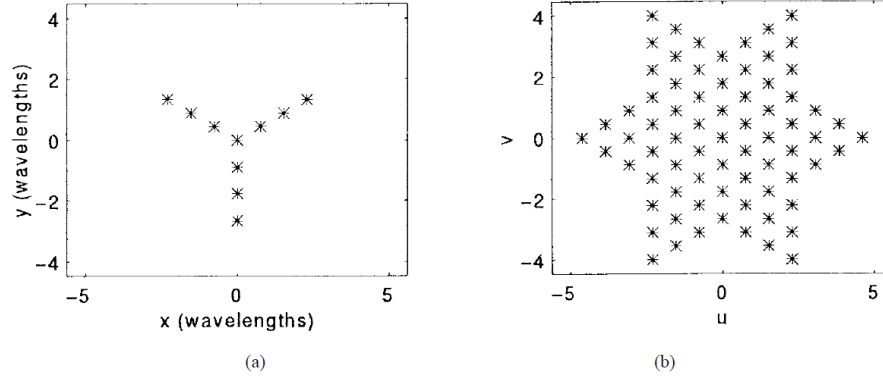
SMOS-satelliitissa nämä ehdot eivät toteudu, vaan kuvanmuodostus tuotetaan Fringe Wash -funktion ja erilaiset antennikuviot huomioivalla matriisioperaatiolla.

Kaksiulotteinen Fourier-synteesi voidaan toteuttaa monella tavalla. Suunta- ja näkyvyystason tulosjoukko ovat yhtenä muunnostyyppin valinnan kriteereistä. Tarkastellaan muunnetun kirkkauslämpötilan $T_{ij}(\xi, \eta)$ parametrien etäisyyttä origosta:

$$\xi^2 + \eta^2 = \sin^2(\theta) \cos^2(\phi) + \sin^2(\theta) \sin^2(\phi) = \sin^2(\theta) \leq 1. \quad (28)$$

Koko (θ, ϕ) -avaruus on siis yksikköympyrän sisällä. Koska suorakulmainen kaksikulotteinen Fourier-muunnos integroi suorakulmion muotoisen alueen yli, on hyödyllisempää käyttää koordinaattijärjestelmää, joka hyödyntää mahdollisimman suuren alueen tästä yksikköympyrästä siten, että alias-vapaa alue on mahdollisimman suuri. Heksagonaalinen koordinaattijärjestelmä tuottaa suurimman mahdollisen alias-vapaan alueen käyttämällä rajattua määrää antenneita. Esimerkiksi SMOS-satelliitissa on hyödynnetty heksagonaalista koordinaattijärjestelmää antennien asettelussa. Antennit on aseteltu Y-muotoon 120 kulmassa toisiinsa nähden oleviin antennihaaroihin (kuva 2 a). Tämä asettelu on heksagonaalisessa koordinaatistossa

tehokkain, sillä se saavuttaa laajimman kulmaulottuvuuden kirkkauslämpötilafunkti-
tiossa, mikäli radiometrien määrä on rajoitettu. Y-muotoisen antennin näkyvyys-
funktion ulottuvuudet on esitetty kuvassa 2 b. [4]



Kuva 2: Yksinkertaistus antennimuodostelmasta ja muodostelman avulla tuotetun
näkyvyysfunktion ulottuvuudet u, v -koordinaateissa. [4]

Heksagonaalista Fourier-muunnosta varten koordinaatistot sekä suunta- että nä-
kyvyysulottuvuudessa on vaihdettava heksagonaalisiksi kuvauksilla $(u, v) \rightarrow (k_1, k_2)$
ja $(\xi, \eta) \rightarrow (n_1, n_2)$, jossa k_i ja n_i ovat heksagonaalisia koordinaatteja. Kuvaukset
on määritelty seuraavasti

$$(u, v) = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} dk_1, \frac{d}{2}(-k_1 + 2k_2) \right); \quad k_1, k_2 \in [0 \dots N_T - 1] \quad (29)$$

ja

$$(\xi, \eta) = \left(\frac{1}{\sqrt{3}N_T d}(n_1 + n_2), \frac{1}{N_T d}n_1 \right); \quad n_1, n_2 \in [0 \dots N_T - 1], \quad (30)$$

jossa d on antennihaaroissa olevien peräkkäisten antennien etäisyys toisistaan ja
 $N_T = 3N_{EL} + 1$ interferometrinen antennien kokonaismäärä, kun antenneja on yh-
dessä haarassa N_{EL} . Tämän koordinaattimuunnoksen jälkeen voidaan vihdoin esittää
kuvanmuodostusfunktio heksagonaalisen Fourier-muunnoksen muodossa

$$\begin{aligned} T(n_1, n_2) &\equiv T(\xi(n_1, n_2), \eta(n_1, n_2)) \\ &= \frac{\sqrt{3}d^2}{2} \sum_{n_1=0}^{N_T-1} \sum_{n_2=0}^{N_T-1} V(k_1, k_2) e^{j2\pi[u(k_1, k_2)\xi(n_1, n_2) + v(k_1, k_2)\eta(n_1, n_2)]} \\ &= \frac{\sqrt{3}d^2}{2} \sum_{n_1=0}^{N_T-1} \sum_{n_2=0}^{N_T-1} V(k_1, k_2) e^{j\frac{2\pi}{N_T}(k_1 n_2 + k_2 n_1)}. \end{aligned} \quad (31)$$

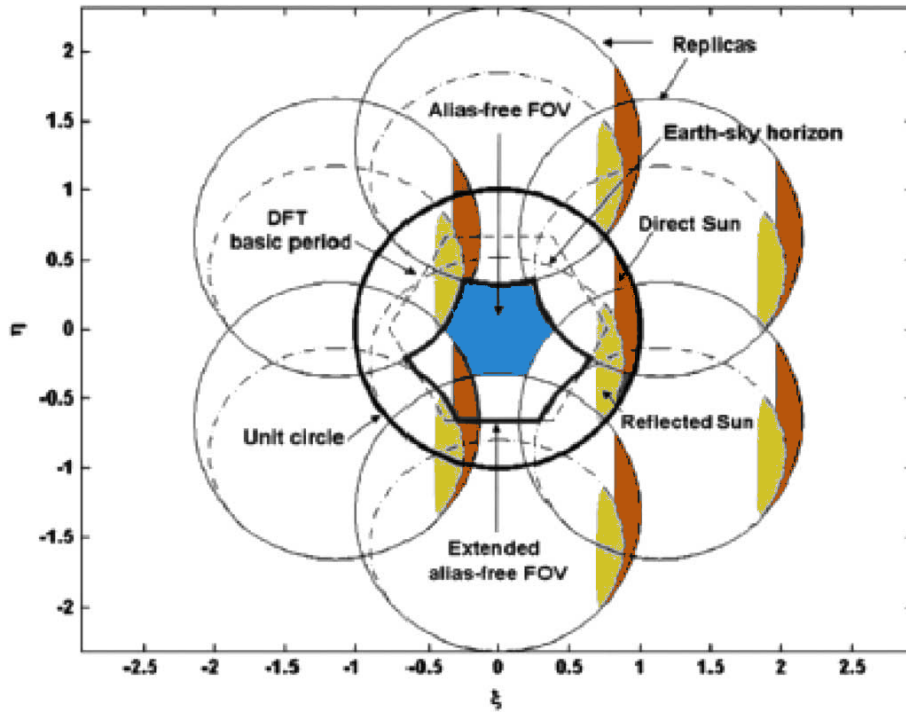
Kuten muutkin näytteistystä käyttävät Fourier-muunnosoperaatiot yleensä, myös
interferometrinen kuvanmuodostus kärsii alias-laskostumisilmiöstä. Fourier-synteesi

tuottaa kulmakosinien tason (ξ, η) yksikköympyrän sisälle kuvan spatiaalisesta kirkkauslämpötasosta omille koordinaateilleen, mutta siihen summautuu myös komponentteja viereisistä laskostumista. Origoa lähimmät origon laskostumat ovat kohdisa

$$(\xi_n, \eta_n) = \frac{2}{\sqrt{3}d} \left(\cos\left(\frac{n\pi}{3}\right), \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \right); n = 0, 1, \dots, 5, \quad (32)$$

eli yksikköympyrän ympärille muodostuu osittain päällekkäin kuusi kopiota yksikköympyrästä. [4]

Kuvassa 3 on esitetty spatiaalisen syntetisoidun kirkkauslämpötilakuvan yksikköympyrän laskostumat. Katkoviivalla on yksikköympyrässä ja sen laskostumissa esitetty maan ja taivaan välinen horisontti sekä laskostumien vastaavat rajapinnat. Taivas on kirkkauslämpötilaltaan hyvin kylmä, joten taivaan laskostuma ei aurinkoa ja kuuta lukuunottamatta juurikaan häiritse maanpinnalta mitattuja kirkkauslämpötiloja. Tämän vuoksi alias-vapaata aluetta (sininen kuusikulmainen alue keskellä) voidaan laajentaa laajennettuun alias-vapaaseen alueeseen. Yksikköympyrään tulevat myös sekä suoraan (oranssit alueet) että merenpinnan heijastuksen kautta (keltaiset alueet) säteilevän auringon additiivinen kirkkauslämpötila.



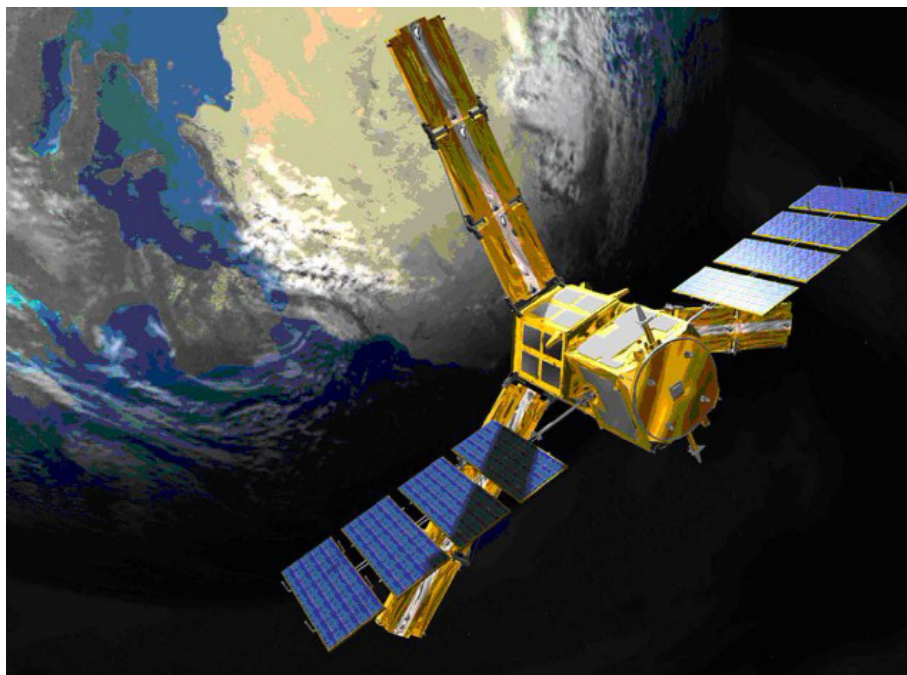
Kuva 3: Interferometrisen synteessin yksikköympyrä ja sen laskostumat Y-muotoisella antennimuodostelmalla. Muokattu artikkelista [5]

4 SMOS

4.1 SMOS-satelliitti

SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) on Euroopan avaruusjärjestö ESA:n ja Ranskan avaruusjärjestö CNES:n yhteinen satelliittiprojekti. Vuonna 2009 laukaistun SMOS-satelliitin tarkoitus on tarjota lähes reaaliaikaista dataa valtamerien suolapitoisuuksista ja maaperän kosteusarvoista. Satelliitin ainoana hyötykuormana toimii interferometrinen MIRAS-radiometri (Microwave Interferometric Radiometer with Aperture Synthesis).

SMOS-satelliitti (kuva 4) kuuluu muiden stelliittien muassa ESA:n Earth Explorer opportunity missions -kategoriaan, jonka tarkoituksena on ohjata suhteellisen pieniä projekteja, jotka liittyvät maapallon erilaisten luonnonprosessien tutkimiseen sekä niiden tutkimista edistävän teknologian kehittämiseen. SMOS:n lisäksi esimerkiksi napajäätiköitä tutkiva CryoSat kuuluu tähän kategoriaan. SMOS on pääosin ranskalais-espanjalainen ohjelma, mutta siihen liittyviä pienempiä projekteja on käynnissä eri puolilla Eurooppaa.



Kuva 4: SMOS-satelliitti taiteilijan esittämänä. [6]

MIRAS-radiometrin mitattavaksi on valittu IEEE:n määrittelemä mikroaaltolaueen L-kaistalle sijoittuva 1400-1427 MHz (aallonpituudet 21,0-21,4 cm). Valinnalla on kaksi tärkeää syytä: Tällä taajuuskaistalla mitattavan kohteen kirkkauslämpötila muuttuu herkästi maaperän kosteudesta sekä valtamerten suolaisuudesta riippuen ja tämä taajuuskaista on elektronisten laitteiden radiosäteilyn osalta kiellettyä aluetta. Koko taajuuskaista on siis rauhoitettu tutkimuskäyttöön, joten mittauksella ei pitäisi olla juurikaan ihmisen aiheuttamaa häiriötä. Käytännössä häiriö on kuitenkin suuri tekijä mittauksissa, sillä hyötysäteilyn teho on hyvin pieni mahdolliseen

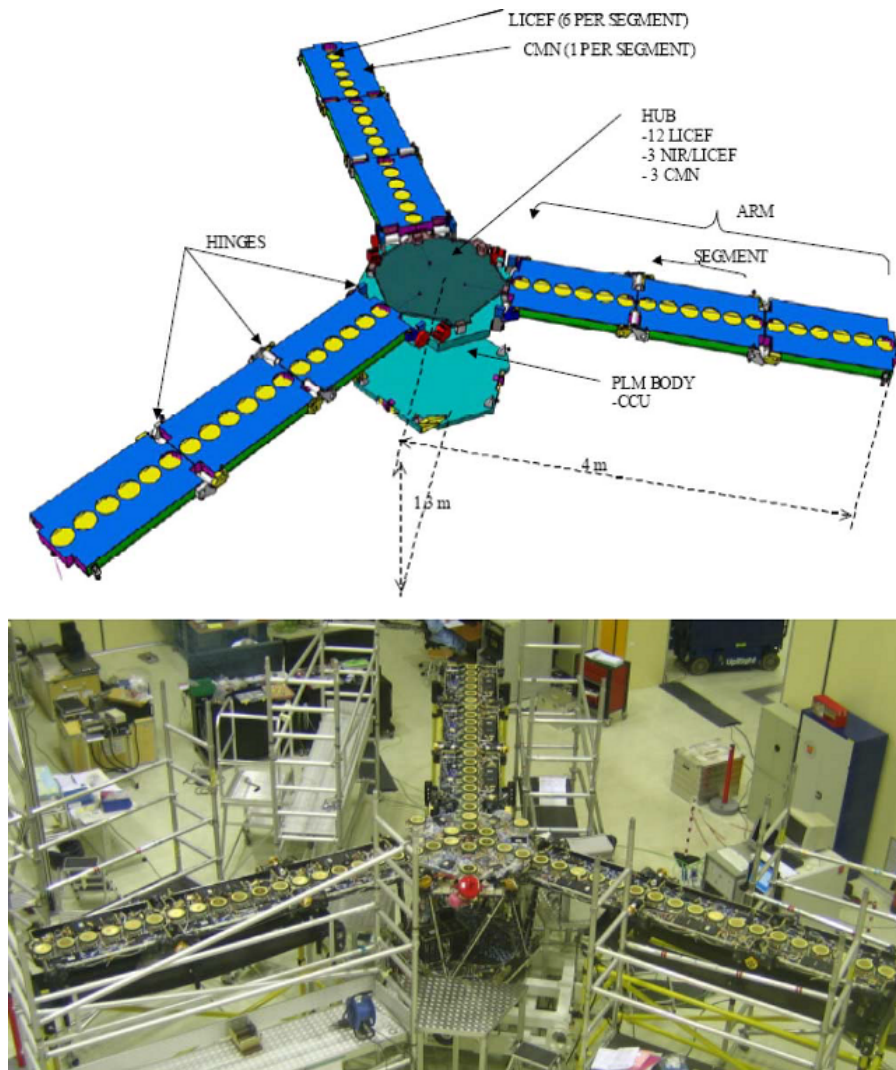
häiriöön nähden, joten heikkokin radiolähetys tällä taajuualueella tuottaa suuren häiriön mittauksiin.

Satelliitti kiertää aurinkosynkronisella kiertoradalla Pohjoinen-Etelä -suunnassa siten, että sen paikallinen aika on vuorotellen noin 6:00 ja 18:00, jolloin aurinko häiritsee mittausta mahdollisimman vähän. Tällöin kirkkauslämpötilojen mittausrésoluutio on yhden kelvinin luokkaa. Satelliitti etenee keskimäärin 750 km korkeudessa [6], mikä riittää MIRAS-radiometrillä noin 900 kilometrin kokoisen alueen radiometriseen kuvaukseen ja 30-50 kilometrin kirkkauslämpötilapikseliresoluutioon. Radiometriset kuvat otetaan 1,2 sekunnin integraatioajalla, jolloin radiometrinen tarkkuus on maata mitattaessa kirkkauslämpötiloina 3,5 ja 5,8 kelvinin välillä sekä merenpintaa mitattaessa 2,5 ja 4,1 kelvinin välillä. Tämä vastaa maaperän kosteuksissa noin 4 kosteusprosentin tarkkuutta ja merenpinnalla 3-5 psu (3-5 g/l) suolaisuutta. [5]

SMOS:n mittausininstrumentti MIRAS koostuu keskusyksiköstä ja kolmesta koontaitettavasta antennihaarasta (kuva 5), jotka tekevät satelliitin halkaisijaksi 8 metriä. Haarat on asetettu tasaisin välein 120 asteen kulmaan toisiinsa nähden siten, että yksi haaroista osoittaa sivulle satelliitin etenemissuuntaan nähden. Haaroissa on 54 radiometriä ja keskusyksikössä 15. Radiometrejä on kahdentyypisiä; LICEF (Lightweight Cost-effective Frontend) sekä kohinainjektioradiometri NIR (Noise Injection Radiometer). Antenniharoihin sekä keskusyksikköön sijoitettuja LICEF-radiometrejä käytetään tarkassa interferometrinen näkyvyyksien määrittämisessä ja keskusyksikössä sijaitsevat NIR-radiometrit kalibroivat kirkkauslämpötilojen laskeamisessa käytettävät kerroinparametrit tehoarvoja vastaaviksi. NIR-yksikkö sisältää kaksi LICEF-vastaanotinta kytkettynä yhteen antenniin. Yhteensä MIRAS sisältää 69 antennia ja 72 radiovastaanotinta.

Mittausprosessissa LICEF-yksiköt tuottavat kaksi yhdellä bitillä kvantisoitua signaalia, jossa bitit merkitsevät signaalin I- ja Q-komponenttien amplitudin etumerkkiä. Signaalit siirretään optista kuitua pitkin korrelaattori- ja ohjausyksikössä (CCU) sijaitsevaan digitaaliseen korrelaattoriin, jossa jokaisen kahden LICEF-parin signaalien välille muodostetaan korrelaatiokerroin 1,2 sekunnin integrointijakson ajalta. Korrelaatiot siirretään CCU:n muistiin maahan lähetystä varten. Tämä on matalimman tason radiometrinen informaatio, joka satelliitista lähetetään maahan. Koska LICEF:n vastaanottama signaali kvantisoidaan vakiotehoiseksi etumerkkisignaalksi, on vastaanotettava kokonaistehoarvo mitattava NIR-radiometreillä erikseen.

Tarkan lopputuloksen saavuttamiseksi, radiometrit on kalibroitava, eli laskennassa käytettävät parametrit on säädettävä mittaustuloksen kannalta sopiviksi. Tämän vuoksi MIRAS sisältää kalibroitajajärjestelmän (Calibration Subsystem, CAS), joka syöttää kalibraatiomoodissa korreloidun testisignaalin radiometreille. Testisignaalin avulla pystytään kalibroimaan LICEF-radiometrien amplitudi- ja vaihekerroimet. LICEF-radiometreissä on neljä sisääntuloa; kaksi porttia antennilta (H- ja V-polarisaatio), kalibraatiosignaalin sisääntulo sekä U-sisääntulo korreloimattomalle kalibraatiosignaalille. Nämä neljä sisääntuloa eivät ole yhtäaikaisessa käytössä, vaan kaikilla on LICEF-radiometreissä omat toimintamoodinsa. Myös NIR-radiometrit kalibroidaan CAS-järjestelmän avulla. NIR kykenee mittaamaan täysipolarimetristä antennikohinaa tai CAS-järjestelmän syöttämää kohina-amplitudia eri moodeis-



Kuva 5: SMOS-satelliitti koostuu keskusyksiköstä ja kolmesta antennihaarasta. [5]

saan.

Kaikki kolme NIR-radiometriä koostuvat yhdestä antennista kahdella LICEF-vastaanottimella ja yhdestä NIR-kontrollerista (NIC). Yhteen antenniin kytkettyihin kahteen LICEF-vastaanottimeen syötetään yhtäaikaaisesti LICEF-antennien H- ja V-polarisaatiot. Kumpaankin vastaanottimeen syötetään myös vaihtelevan pituisia kohinapulsseja antennin lämpötilan mittausta varten. Pulssin pituus säädetään sellaiseksi, että keskimääräinen LICEF-sisääntulon teho vastaa U-sisääntulon fyysisistä lämpötilaa. [5]

4.2 Polarimetriset tilat

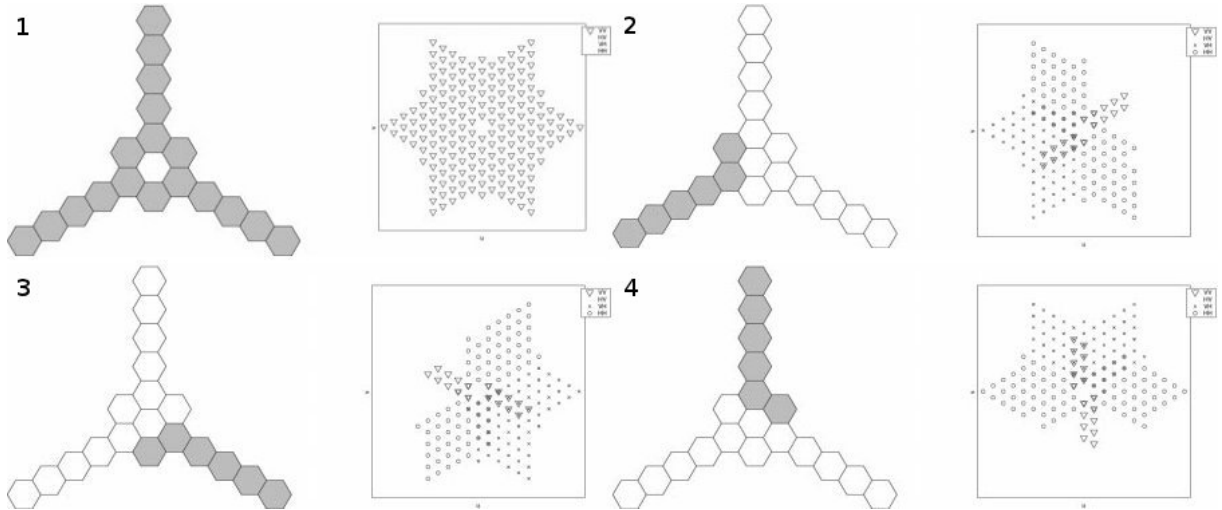
SMOS-satelliitin MIRAS-radiometrijärjestelmän LICEF-radiometrit kykenevät mittaamaan kohinaa sekä horisontaali- että vertikaalipolarisaatioilla (H- ja V-polarisaatiot). Yksi LICEF kykenee mittaamaan ainoastaan yhtä polarisaatiota kerrallaan.

Koska kummastakin polarisaatiosta voidaan saada hyödyllistä, toisistaan riippumattonta informaatiota maanpinnan kirkkauslämpötiloista, vaihtelee MIRAS mitattavaa polarisaatiota integraatiojaksojensa välillä.

MIRAS-radiometrijärjestelmässä on mahdollista käyttää kahta eri polarimetristä tilaa; kaksoispolarisaatiotilaa ja täyspolarimetristä tilaa. Kaksoispolarimetrisen tila on yksinkertaisempi. Se mittaa vuorotellen H- ja V-polarisaatioita. [7]

Täysipolarimetrisessä moodissa antennihaarat kytketään toimimaan eri polarisaatiotiloissa kuvan 6 mukaisesti. Ensimmäisessä polarisaationvaihtojaksossa kaikki antennihaarat mittaavat kuvan 7 mukaisesti integrointijakson $\tau = 1,2s$ ajan samaa vertikaalipolarisaatiota (kuvan 6 jakso 1) ja tämän jälkeen on kolme $\tau/3 = 0,4s$ jaksoa, joissa yksi haara mittaa horisontaalipolarisaatiota ja kaksi vertikaalista (kuvan 6 jaksot 2-4). Jaksoista 2-4 syntyvät ristipolarimetriset integraatiot tuottavat vajaat tähtimuodostelmat (kuvan 6 laatikoissa), jotka muodostetaan täydeksi näkyvyysfunktioiksi, joka sisältää interferometristä informaatiota sekä H- että V-polarisaatiosta. Näkyvyysfunktion tietyt pisteet sisältävät päällekkäin kertoimia useasta eri polarisaatiomoodissa olevasta antenniparista. Jaksoja 1-4 seuraavat jaksot 1'-4', joissa polarisaatiot ovat edellisiin jaksoihin nähden käänteiset. [8]

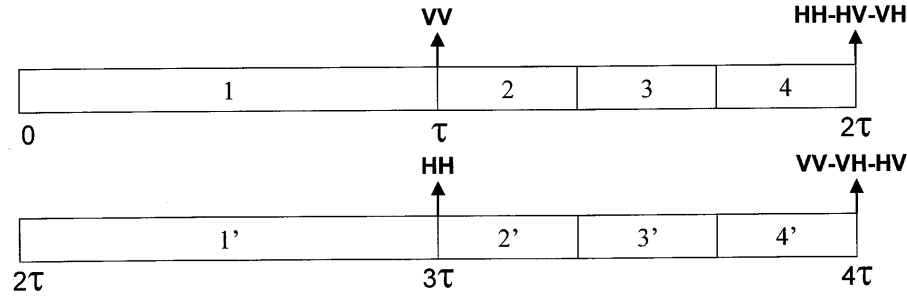
Satelliitin komissiovaiheessa päätettiin, että täysipolarimetrisen tila pidetään toiminnassa satelliitin loppuiäksi, eikä kaksoispolarimetristä tilaa ole enää käytetty mittauksessa tämän jälkeen.



Kuva 6: Antennihaarojen polarisaatiot ja niiden näkyvyysfunktio täysipolarimetrisen tilan integraatiojaksoissa 1-4. [8]

4.3 SMOS-datatuotteet

SMOS-satelliitin laitteiston tehtävänä on mitata antennien välisiä korrelaatioker-toimia. Laitteiston mittaamista kertoimista pystytään päättelemään maaperän kos-teutta ja valtamerten suolaisuutta vasta monitasoisen ja hyvin monimutkaisen las-kentaprosessin jälkeen. Laskentaprosessorilta vaaditaan sekä korkeaa laskentatehoa että suurta muistikapasiteettia.



Kuva 7: Integraatiojaksojen 1-4 ja 1'-4' aikajana. [8]

Prosessin sisäistäminen vaatii sekä matemaattista, fysikaalista että luonnontieteellistä ymmärrystä. Tässä diplomityössä ei syvennytä näiden tieteenalojen yksityiskohtiin, vaan tässä luvussa esitetään datatuotteiden eri tasojen sekä niiden prosessointimallien pääpiirteet. Datatuotteiden tasot on jaettu tasoihin L0- L1, L2, jne (Level 0, 1, 2,...). Tässä työssä keskitytään lähinnä L1-tasoon, jotka on jaettu a- b- ja c-alitasoihin. Nämä tasot esitellään seuraavissa alaluvuissa. [9]

4.3.1 L0 - Raakadata

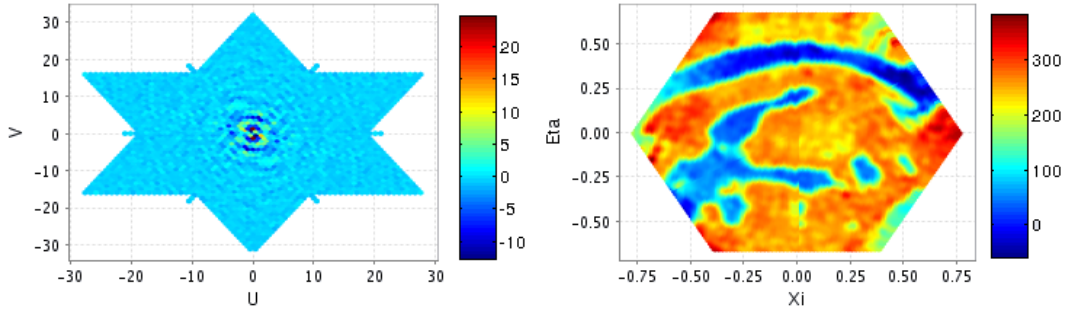
L0-data sisältää korrelaatiokertoimet, kohinainjektioradiometrien teholumvut sekä ylläpitoarvoja. SMOS-satelliitin keräämä data lähetetään maanpäälliselle asemalle jokaisen yllälennon yhteydessä. Maanpäällinen L0-prosessori kerää binääridatat puolen kiertoradan mittaisiksi tuotteiksi ja tuottaa binääridatan rinnalle ASCII-muotoisen XML-ylätunnisteen, jotta tuotteesta saisi helposti selvitettyä perustiedot myös ilman L1-dataprosessoria. Binääridata koostuu tieteellisestä mittausdatasta sekä avustavasta datasta. [9]

4.3.2 L1a - Kalibroidut näkyvyudet

Prosessoitaessa L0- tuotteita L1a-tuotteeksi, raakadatan mittausyksiköt muutetaan tieteelliseen muotoon. Tämä tehdään sekä tieteelliselle että avustavalle datalle. Tieteellinen data sisältää kaavan 23 mukaiset näkyvyysarvot. Avustavasta datasta tuotetaan tieteelliselle datalle kalibroitikertoimet ja ylläpitotelemetry- eli HKTM-data (House Keeping Telemetry). Kalibroitikertoimien avulla pystytään tuottamaan tieteellinen L1a-data, joka tarkoittaa käytännössä kalibroituja näkyvyysarvoja. Kalibroinnissa on käytetty muun muassa edellisessä luvussa esitettyä CAS-kalibroitijärjestelmää. L1a-tason datan toista osaa, HKTM-dataa, käytetään L1-prosessoinnin seuraavissa vaiheissa.[9]

4.3.3 L1b - Kirkkauslämpötilat ja kuvanmuodostus

L1a → L1b -prosessoinnissa on pääosin kyse kuvanmuodostuksesta L1a-tason datasta. L1b-data on kaavasta 23 saatuja kulman funktiona olevia kirkkauslämpötila-arvoja. Prosessoinnissa lisäksi myös ulkoisten lähteiden, kuten auringon, kuun ja



Kuva 8: L1b-tason dataa yhden integraatiojakson ajalta visualisoituna SMOSView-sovelluksella. Vasemmalla L1b-tason Fourier-komponentit ja oikealla L1b-tason komponenteista Fourier-muunnoksen avulla muodostettu kirkkauslämpötilakuva. Väriskaalan yksikkönä kelvin.

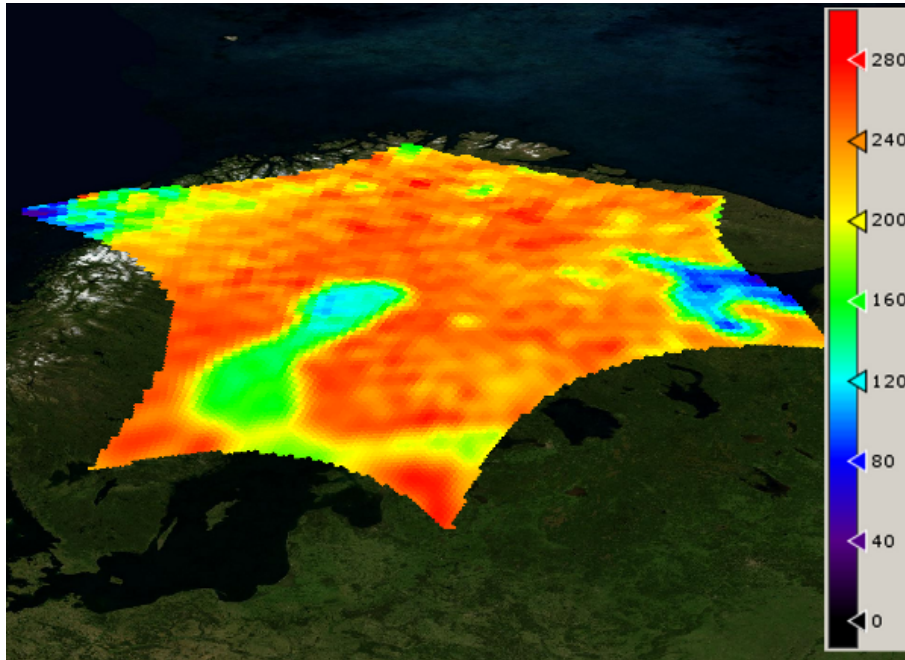
Linnunradan, vaikutukset kirkkauslämpötilaan kumotaan. Kummassakin operaatiossa käytetään hyväksi järjestelmävastefunktiota, G-matriisia. G-matriisi vastaa siirtofunktiota kirkkauslämpötiloista kalibroituuihin näkyvyyksiin.

Laskennan helpottamiseksi, G-matriisi on muutettu kooltaan pienemmäksi J-matriisiksi, joka toimii Fourier-avaruudessa, toisin kuin G-matriisi. Kuvanmuodostus suoritetaan J-matriisin pseudoinverssillä J^+ , joka muuntaa kalibroidut näkyvyydet kuvanmuodostuksessa käytettäviksi kirkkauslämpötilojen Fourier-komponenteiksi, kuva 8 vasemmalla. Itse kuvanmuodostus, kuva 8 oikealla, voidaan suorittaa Fourier-muunnoksella. [10] Kuvassa näkyy ylhäällä horisontti, koska satelliitti on kallistettu osoittamaan 32° kohti menosuuntaa.

Ulkoisten lähteiden vaikutuksen kumoaminen tehdään tunnetun tähtikartan sekä auringon ja kuun sijainnin avulla tuotetun kirkkauslämpötilakuvion avulla. Myös auringon säteilyn heijastus merestä otetaan huomioon. Kirkkauslämpötilat kerrotaan ristitulona G-matriisin kanssa, jolloin saadaan tuloksena Fourier-komponentit, jotka voidaan vähentää mitatusta tieteellisestä datasta. [10]

4.3.4 L1c - kirkkauslämpötilat maanpinnan koordinaattijärjestelmässä

L1b \rightarrow L1c -prosessointioperaatiossa kirkkauslämpötilapikselit muunnetaan interferometrisen radiometrin omasta suuntakosinikoordinaatistosta maanpinnalle sijoitettujen DGG-koordinaatiston (Discrete Global Grid) pikseleiden funktioksi. Jokainen maanpinnalla oleva DGG-pikseli saa parametreikseen usealla ajanhetkellä havaittuja kirkkauslämpötiloja sekä kyseisiltä ajanhetkiltä muun muassa kulman, jolta suunnalta havainto on tehty, radiometrisen tarkkuuden sekä ionosfäärin aiheuttamien vääristymien korjauskertoimia. [10] Kuvassa 9 on esitetty kartalle projisoitu L1c-kuva. Kuva on laskevalta radalta, joten satelliitti on tulossa kartan oikeasta yläviistosta vasempaan alaviistoon. Kuvio on kuvan 3 laajennetun alias-vapaan alueen muotoinen, mutta se on venynyt kohti menosuuntaa, koska kuvio on projisoitu maan pinnalle.



Kuva 9: Kartalle projisoitu alias-vapaan alueen L1c-kirkkauslämpötilakuva. Kirkkauslämpötilat kelvineinä.

4.3.5 Korkeamman tason datatuotteet

L1c:tä seuraava taso on L2. Tällä tasolla L1c-tason eri kulmilla mitatut kirkkauslämpötila-arvot pikseleissä muutetaan yksittäisiksi maaperän kosteus- ja merten suolaisuusarvoiksi. Jokainen DGG-pikseli sisältää tällöin yhden arvon. Muunnoksessa käytetään monimutkaisia funktioita, jotka ottavat huomioon monia tietoja pinnan koostumuksesta ja lämpötilasta. [11]

L3-tasolla nämä L2-tason arvot on keskiarvoistettu suuremman pikselialueen ja usean päivän yli. Valtamerten suolaisuus on esitetty $200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$ ruuduissa 10 päivän yli keskiarvoistettuna. [11] L4-tason merenpinnan suolaisuusdataan on otettu huomioon myös maanpinnalla tehtyjä mittauksia, jotka parantavat mittauksen tarkkuutta. [12]

5 Radiotaajuiset häiriöt SMOS-satelliitin mittauksissa

Maanpinnalla olevan radioteknologian aiheuttamat radiotaajuiset häiriöt (Radio Frequency Interference, RFI) ovat suurena ongelmana L-kaistan interferometrisessä radiometriassa. Häiriöt voivat ilmetä kuvanmuodostuksen jälkeen pistemäisenä tai pienialaisena kirkkauslämpötilapiikkinä, mutta ajoittain häiriö on niin voimakasta, että sen vaikutus jokaiseen pikseliin on tuhoisa. Radiotaajuisen häiriön määrä on riippuvainen esimerkiksi maantieteellisestä sijainnista, integraatiojakson ajanhetkestä lyhyellä aikavälillä, mittauspäivästä, polarisaatiotilasta ja mittaussuunnasta. Kaikkien näiden parametrien muuttaminen saattaa muuttaa häiriön määrää huomattavasti.[13]

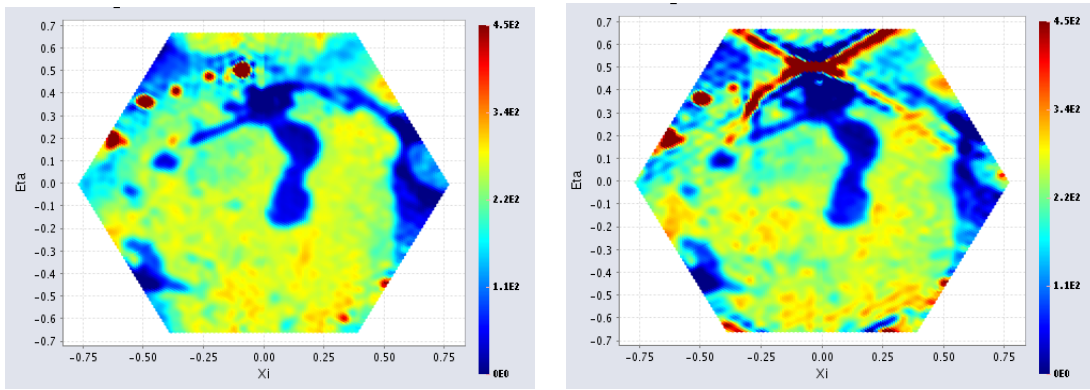
Häiriötä aiheuttavat yleensä radiolähettimet. Vaikka myös taivaankappaleet häiritsevät mittausta, niiden vaikutus on hyvin tunnettu ja vaikutus voidaan kumota melko tehokkaasti tietyillä algoritmeilla. L-kaistan taajuudet välillä 1400-1427 MHz ovat radiolähettyksen osalta kiellettyä aluetta [5], mutta tietynlaisissa radiolaitteissa on vaikea välttää tehospektrin kaistan laajentumista tälle alueelle. Häiriötä voivat aiheuttaa lähettimien perustaajuuksien harmoniset taajuudet, lähettimet, joiden taajuuskaista on hyvin lähellä kiellettyä aluetta tai tutkalaitteet, jotka lähettävät hyvin lyhyitä, taajuusalueessa laajakaistaisia impulsseja. Seuraavassa listassa on lueteltu eräitä L-kaistan häiriötä aiheuttavia tekijöitä. Usein käy myös niin, ettei laitteiden suunnittelijat ole tietoisia kielletystä kaistasta. Tällöin laite saattaa lähettää signaalia suoraan tällä kaistalla. [13]

- Pitkän matkan ilmatilanvalvontatutkat kaupallisilla lentoasemilla ja sotilastutkikohdissa
- Lentoasemien paikallisilmatilanvalvontatutkat
- MSS-satelliittipuhelinjärjestelmän tietoliikenne
- Televisiolähetysatelliitit
- Sääsatelliitit
- GPS-satelliittien tietyt tiedonsiirtomenetelmät
- Maanpäälliset UHF-televisiolähetykset
- Sotilasilmalauradioliikenne [14]

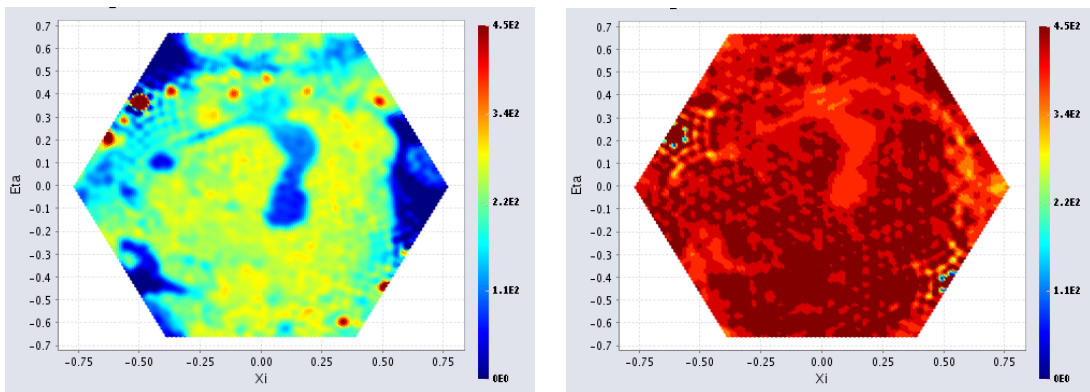
Kuvissa 10(a)-10(d) on esitetty lähinnä lentoasemien tutkien aiheuttamaa häiriötä L1b-mittauksissa satelliitin ollessa Pohjoismaiden yllä laskevalla radalla. Kuvan 10(a) yläreunassa olevat korkean kirkkauslämpötilan punaiset pisteet ovat maan ja taivaan välisenstä horisontista näkyvien tutkien aiheuttamaa häiriötä. Tutkien lähetysantennit suuntaavat parhaiten matalalle lähes maanpintaa pitkin, joten niiden aiheuttamat pahimmat häiriöt näkyvät erityisesti horisontissa. Täplien kirkkauslämpötilat ovat reilusti yli 1000 K, kun taas luonnolliset kirkkauslämpötilat ovat

yleensä alle 300 K luokkaa. Pyörivillä antenneilla varustettujen skannaavien tutkien impulssimaisen signaalin vuoksi häiriöt vaihtelevat integraatiojaksosta toiseen. Kuvassa 10(b) näkyy muita tutkien häiriöitä voimakkaampi häiriö, joka leviää impulssivasteena kuvassa kuuteen suuntaan, joista neljä on parhaiten nähtävillä. Impulssivasteet näkyvät myös laskostumina kuvan alareunassa.

Häiriöt vaihtelevat myös polarisaatiosta toiseen. Toisin kuin kaksi ylempää interferometrasta HH-polarisaatiokuvaa, kuva 10(c) on lähes samalta ajanhetkeltä, mutta se on mitattu VV-polarisaatiossa. Tiettyistä paikoista häiriöt häviävät tähän polarisaation vaihtuessa ja tiettyihin paikkoihin niitä ilmestyy lisää. Kuvassa 10(d) kyseessä on ylilento samalta alueelta eri päivältä, jonka aikana mittausta häiritsi koko ylilennon ajan yksittäinen hyvin voimakas häiriö, jonka kirkkauslämpötila oli noin 38 000 K, mikä on yli 100 kertaa suurempi kuin tavoitellut luonnolliset kirkkauslämpötilat. Näin voimakas häiriö vaikuttaa kuvan jokaiseen pikseliin siten, että koko muodostettu kirkkauslämpötilakartta on käyttökelvoton maaperän kosteuden laskemisessa.



(a) HH-plarisaation häiriöt kuvan horisontissa (b) HH-polarisaation voimakkaampi häiriö ja sen impulssivaste kuvan horisontissa



(c) VV-polarisaation häiriöt

(d) HH-polarisaatiossa esiintynyt voimakas häiriö, joka tekee kuvan käyttökeltottomaksi

Kuva 10: Tutkien aiheuttamia häiriöitä L1b-tason kuvissa (a)-(c) yhden ylilennon aikana Pohjoismaiden yllä sekä kuvassa (d) eri ylilennolta samasta kohtaa. Yksikönä kelvin.

5.1 Radiotaajuiset häiriöt maailmanlaajuisesti

Tarkasteltaessa radiotaajuisten häiriöiden vaikutuksia Suomessa, on hyödyllistä vertailla tilannetta maapallon muihin osiin. On selvää, että häiriöitä esiintyy enemmän mannerten niillä alueilla, joilla on enemmän radiotoimintaa, etenkin luvussa 5 lueteltuja häiriöiden aiheuttajia. On myös selvää, että vähiten häiriötä on valtameren alueilla, joilla ei käytännössä ole juuri minkäänlaisia radiolähettäviä. Tyynen valtameren yllä ainoat mahdolliset häiriöt tulevat muista satelliiteista, laivoista ja avaruudesta. Luvussa 6.1 esitettävä algoritmi tunnistaa lähes joka ylilennolla myös valtamerillä radiotaajuista häiriötä.

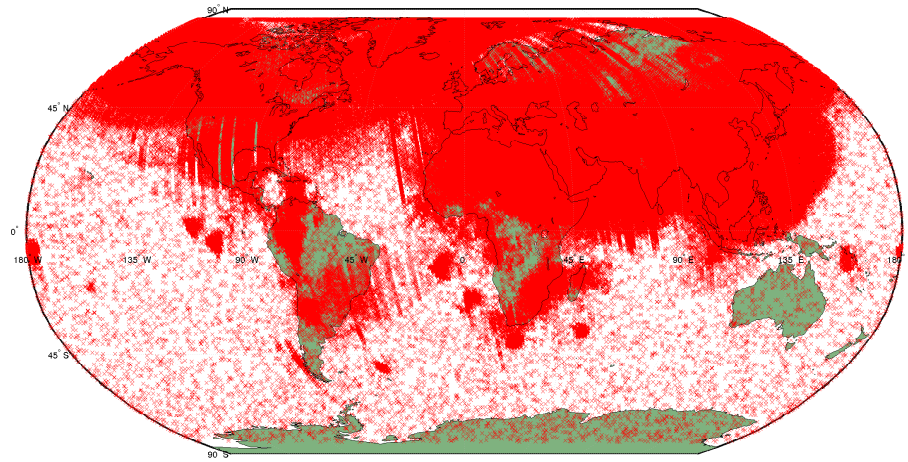
Tarkasteltaessa millä maapallon alueilla algoritmi havaitsee häiriöitä, on syytä tarkastella erikseen nousevaa (pohjoiseen suuntautuvaa) ja laskevaa (etelään suuntautuvaa) lentosuuntaa. Syynä tähän on koko satelliitin ja siten myös radiometrien pääkeilojen 32° kallistus kohti kulkusuuntaa. [5] Tämän vuoksi esimerkiksi kulkusuuntaan nähden edestäpäin satelliitin kohtaama ilmatilanvalvontatutkien radio-säteily aiheuttaa häiriötä huomattavasti enemmän kuin takaapäin saapuva vastaava säteily. Kuten seuraavissa luvuissa nähdään, satelliitin kulkusuunnalla on huomattava ero häiriöissä esimerkiksi Suomen alueella.

Kuvissa 11(a) ja 11(b) on esitetty kaikki luvussa 6.1 esitetyn algoritmin vuoden 2010 loka- marras- ja joulukuun aikana tekemät häiriömerkinnät maailmankartalla. Jokaisessa kohdassa, jossa herkkä algoritmi havaitsee häiriöitä, on karttaan merkitty pieni punainen rasti. Kuvaan 11(a) on merkitty rastit nousevilta radoilta ja kuvaan 11(b) laskevilta. Kuvia tarkastelemalla voidaan huomata monia seikkoja. Valtaosa radiotaajuisen häiriön aiheuttajista on pohjoisella pallonpuoliskolla. Tämän vuoksi nousevilla radoilla häiriöt ovat laajemmalla alueella, ja täten myös kaukokartoitus häiriintyy useammilla kartan alueilla.

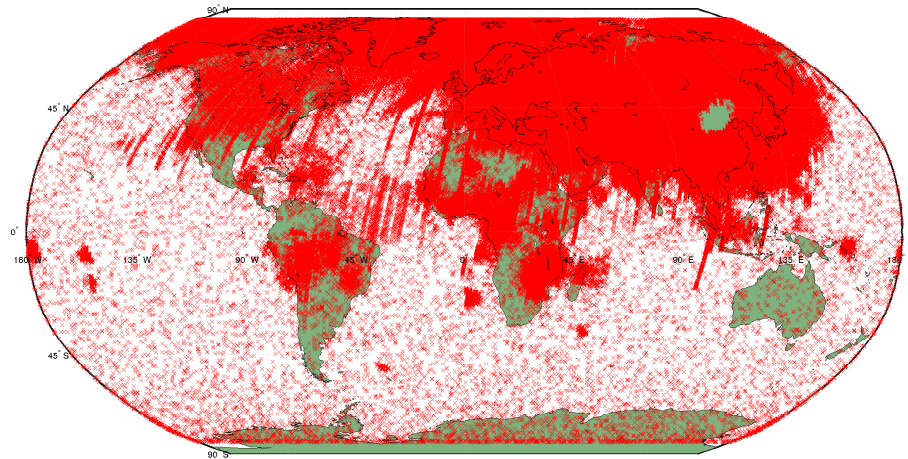
Laskevilla radoilla RFI häiritsee eniten Kanadassa, koko Euroopassa sekä koko Aasiassa. Nousevilla radoilla tilanne on hieman toisenlainen; häiriön alueella on koko Pohjois-Amerikka, Etelä-Eurooppa, Pohjois-Afrikka sekä Etelä-Aasia. Nousevien ratojen maailmanlaajuisesti huonommasta tilanteesta huolimatta Pohjoismaissa ja Siperiassa nousevilla radoilla on laskevia ratoja vähemmän häiriöitä, mikä on syytä ottaa huomioon hyviä maaston kirkkauslämpötilakuvia etsittäessä. Etelään suuntautuvilla radoilla ongelmana ovat kuvassa 8 havaittavat Keski-Euroopan tutkat, jotka eivät häiritse pohjoisen suuntaan edettäessä.

Laskevia RFI-merkintöjä esittävässä kartassa huomion kiinnittää Kiinassa Pekingin alueella oleva alue, jolla ei ole ainuttakaan RFI-merkintää. Tämä on kuitenkin vain algoritmin puutteellisuudesta ja NIR-radiometrin rajallisuudesta johtuva edellisessä alaluvussa mainittu havainnointivirhe. Todellisuudessa häiriö on Pekingin alueella laskevilla radoilla nimenomaan voimakkainta.

Maailmanlaajuisesta RFI-tilanteesta nousevilla ja laskevilla radoilla kertoo myös se, että vuoden 2010 loka- marras- ja joulukuun kaikista integraatiojaksoista nousevilla radoilla oli lähes kaksi kertaa enemmän RFI-merkintöjä. Nousevilla radoilla merkinnän saivat 21,7 % integraatiojaksoista, kun laskevilla radoilla merkintöjä oli vain 12,7 % jaksoista. Kaikkiaan kuukauden aikana oli kummallakin lentosuunnalla noin 4 000 000 integraatiojaksoa. Tilastoista on pääteltävissä, että etelään suun-



(a) RFI-merkinnät kolmen kuukauden ajalta nousevilla radoilla.



(b) RFI-merkinnät kolmen kuukauden ajalta laskevalla radoilla.

Kuva 11: RFI-merkinnät maailmankartalla

nattujen tutkien vaikuttama alue on suurempi kuin pohjoiseen suunnattujen. On kuitenkin mahdollista, että pohjoiseen suunnattuja tutkia on yhtä paljon tai jopa enemmän kuin etelään suunnattuja, mutta ne saattavat vaikuttaa samojen integraatiojaksojen kirkkauslämpötiloihin. Ajettu algoritmi ei nimittäin ota kantaa häiriön aiheuttajien yhtäaikaiseen lukumäärään tai vastaanotettuun häiriötehoon.

5.2 Radiotaajuiset häiriöt Suomessa

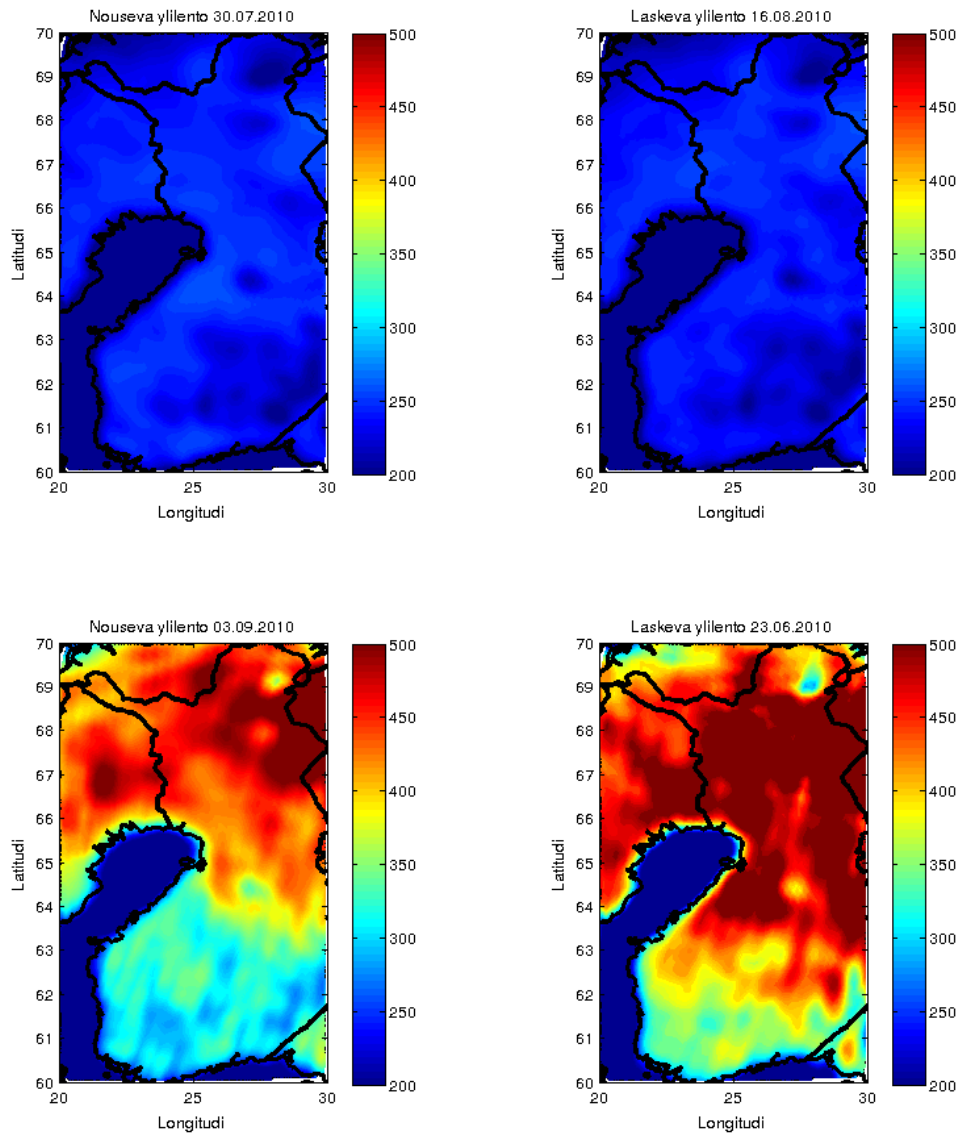
Kun tarkastellaan radiotaajuisten häiriöiden maantieteellisiä sijainteja Suomen ko-koisella alueella, on hyödyllistä tehdä tarkastelu maantieteellisissä koordinaateissa. Tämä onnistuu helpoiten L1c-tasossa, jossa jokainen kirkkauslämpötila kuuluu tiettyyn pisteeseen maailmankartalla. L1c-tason tietorakenteessa kirkkauslämpötilat on jaettu heksagonaalisiin DGG-koordinaatteihin. Jokaisella DGG-pisteellä on joka ylilennoista useita mittauksia eri integraatiojaksoilta ja eri polarisaatioista. Pisteet ovat kuitenkin kaikki peräisin L1b-tason alias-vapaalta alueelta. Saman pisteen kirkkauslämpötilat saattavat muuttua hyvinkin paljon satelliitin kuvauskulmasta riippuen, etenkin, jos pisteessä on havaittavissa häiriötä. Kirkkauslämpötila riippuu kohtauskulmasta myös luonnollisesti sekä maa- että merialueilla [15, 16].

Eräs tutkimuksen yhteydessä hyväksi todettu tapa kirkkauslämpötilan normaali-tason tarkastelemiseen on kirkkauslämpötilojen keskiarvojen laskeminen joka kart-tapisteestä. Kuvassa 12 on esitetty eri kulmista mitatuista kirkkauslämpötiloista keskiarvot sekä nousevalta (vasemmalla) että laskevalta (oikealla) radalta sellaisista ylilennoista, joilla häiriötä on vähän (ylemmät kuvat) ja paljon (alemmat kuvat). Kaikki kuvat ovat samassa väriskaalassa kirkkauslämpötilojen osalta. Merien läm-pötila on tärkeimpien kirkkauslämpötilojen vuoksi jätetty skaalan ulkopuolelle, sillä meri on kirkkauslämpötilaltaan huomattavasti mannerta kylmempi.

Kuvasta 12 nähdään, että ylemmissä kuvassa ei ole juurikaan yli 280 K kirk-kauslämpötiloja. Maa-alueilla järvet erottuvat selvästi muusta alueesta, eikä muita voimakkaita kirkkauslämpötilaeroja ole nähtävissä. Sen sijaan kahdessa alemmassa kuvassa näkyy voimakas häiriön vaikutus Pohjois-Suomessa. Häiriön lähde sijait-see todennäköisesti Pohjois-Suomen sijasta muualla, sillä häiriölähteet ovat yleensä pistemäisiä ja vaikuttavat kirkkauslämpötiloihin laaja-alaisesti kuvan 10(d) tapaan. Sekä nousevan että laskevan kuvan häiriöt tulevat siis todennäköisesti alias-vapaan alueen ulkopuolelta. L1c-kuvista häiriön lähteen suuntaa on vaikea päätellä, sillä kuvissa ei ole enää mukana arvoja laskostuma-alueilta.

Radiotaajuiset häiriöt vaihtelevat polarisaatiomoodin mukaan. Kuvassa 13 on esitetty kirkkauslämpötilojen keskiarvokuvat H- ja V-polarisaatioissa. Itä-Suomessa on nähtävissä pistemäinen radiotaajuisen häiriön lähde vertikaalipolarisaatiossa. Ho-risontaalisessa polarisaatiossa lähteestä ei ole havaittavissa juuri mitään. Kuvan RFI-lähteen sijainti on paikannettu jälkeenpäin tarkemmin HUT-2D-lentokoneradio-metrillä [17] ja lähde on sammutettu. Kyseessä oli langaton valvontakamera Jout-senossa tehdasalueella. Kameran radiolähtetin lähetti signaalia kielletyllä L-kaistan taajuusalueella ja oli siten haitaksi tieteelliselle kirkkauslämpötilamittaukselle.

Mikäli halutaan etsiä kuvasta tehokkaasti häiriöitä, on mahdollista tutkia mui-takin piirteitä kuin keskiarvoja. Jos häiriöt ovat harvoin esiintyvien impulssien muo-dossa, keskiarvoistaminen lieventää vaikutuksia kohti kylmempiä kirkkauslämpöti-loja. Koska häiriön saastuttama pikseli on useimmiten kirkkauslämpötilaltaan kor-keampi kuin sellainen pikseli, jossa ei häiriön vaikutuksia näy, saattaa olla hyö-dyällistä tutkia esimerkiksi kirkkauslämpötilojen maksimi-arvoja. Maksimi-arvoja tut-kailtaessa on otettava huomioon se, ettei häiriön vaikutusta välttämättä enää näe L2-datassa, sillä kyseessä saattaa olla hyvin pienellä kohtauskulmalla mitattu arvo,

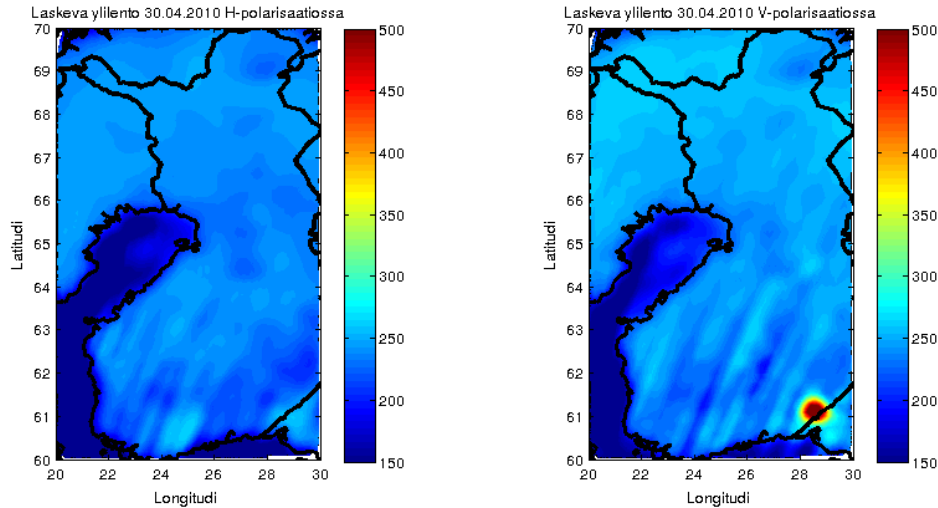


Kuva 12: Neljän ylilennon kirkkauslämpötilakeskiarvot nousevilla ja laskevilla ylilennoilla. Kahdessa ylemmässä kuvassa ylilento, joilla RFI:tä on vähän ja kahdessa alemmassa paljon.

jonka painoarvo lopullisissa tieteellisissä tuloksissa ei ole kovin suuri.

Maksimi-arvoja tutkimalla löydetään radiotaajuuden häiriön vaikutukset tehokkaasti, mutta siinä on RFI-tunnistustyökaluna parantamisen varaa. Maksimi-arvoon vaikuttaa nimittäin häiriön lisäksi myös satelliitin käyttötarkoituksen mukainen mitauskohde; mannerten tai vesialueiden pinnan kirkkauslämpötila.

Yksittäisten ylilentojen tutkiminen ei ole luotettava tapa tutkia pitkällä aikavälillä vaikuttavia häiriöitä. Tämän vuoksi on tärkeää luoda yleiskuva tilastollisesti. Tällaisen yleiskuvan luo esimerkiksi mediaani. Otettaessa mediaani monen eri päivän ylilennon maksimi-, minimi- tai erotusarvoista pikseleiden funktiona, on mah-



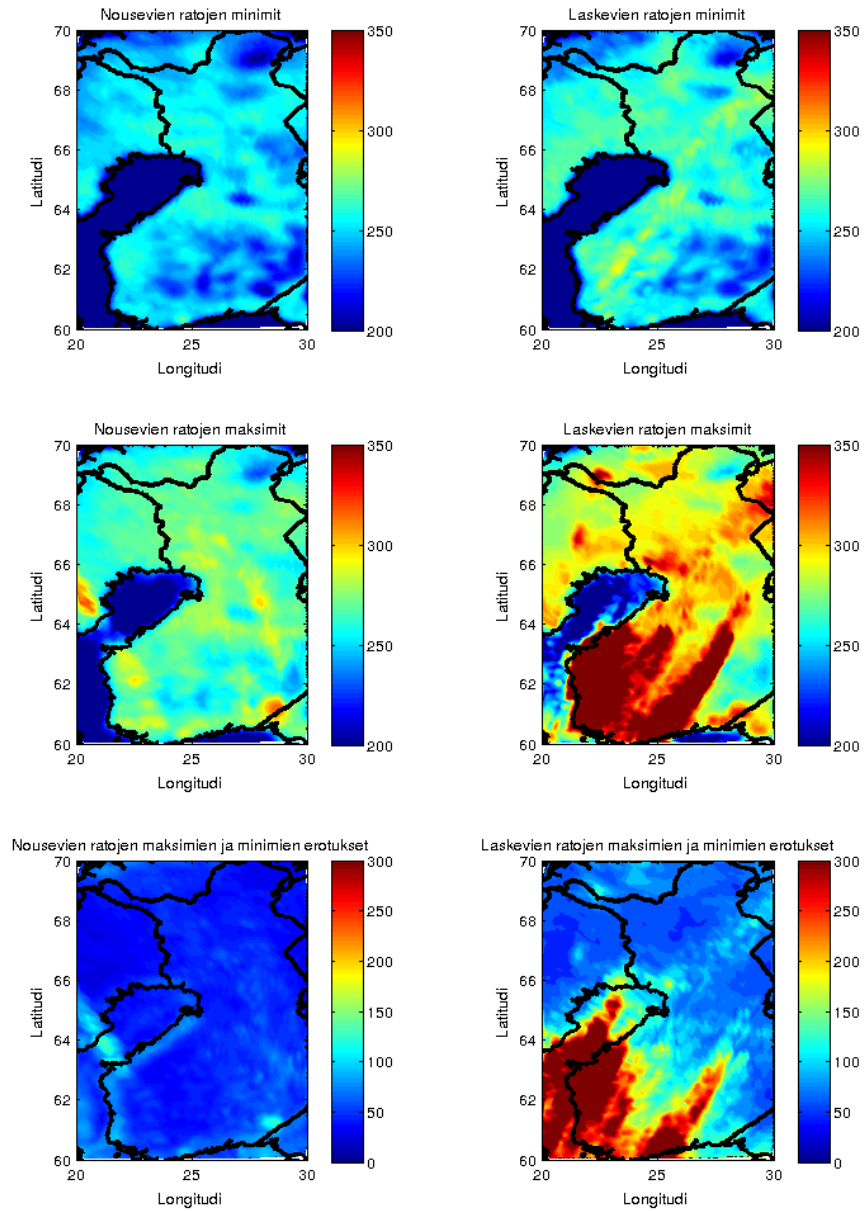
Kuva 13: Kirkkauslämpötilat samalta ylennolta H- ja V-polarisaatiossa.

dollista tarkastella tyypillistä radiotaajuisen häiriön jakautumista Suomen kartalle. Tätä menetelmää tutkitaan myöhemmin luvussa 6.

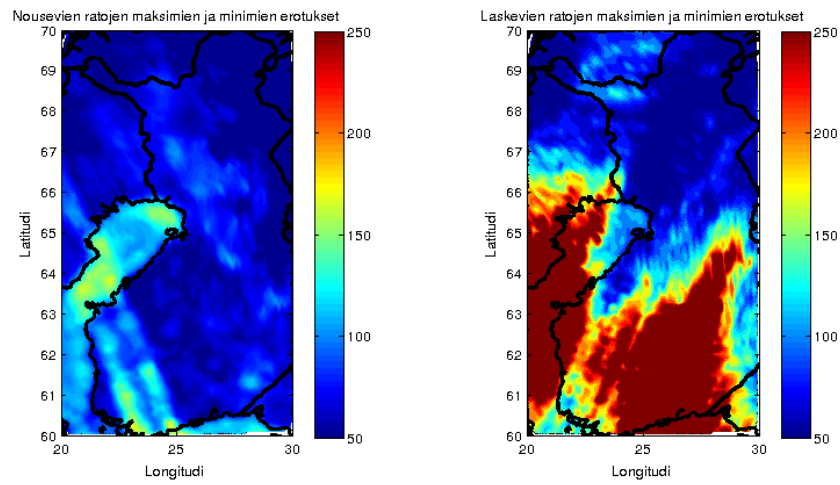
Mediaanien laskemiseen on käytetty 13 nousevan ja 15 laskevan lennon L1c-dataa tasaisin välein vuonna 2010 tapahtuneelta Suomen ylennolta. Kuvassa 14 on esitetty minimien, maksimien sekä minimien ja maksimien erotusten mediaanit kartatasossa sekä nousevilta että laskevilta radoilta V-polarisaatiosta. Minimikuvista on havaittavissa sinisinä näkyvien järvien lisäksi laskevien ratojen mediaanista keltainen juova, joka johtuu Keski-Euroopan tutkien aiheuttamista impulssivasteista (kuten kuvassa 10(b)) kohti satelliitin tulosuuntaa.

Keskimmäisissä maksimikuvissa nämä impulssivasteet ovat huomattavasti voimakkaampia. Nousevien ratojen maksimien mediaanikuvasta erottuu myös satelliitin kulkusuunnassa pohjoismantereelta lähtöisin oleva juova sekä Joutsenon aiemmin mainittu RFI-lähde. Lähde näkyy mediaanikuvassa, vaikka se sammutettiin puolivälissä vuotta 2010. Alimmissa erotuskuvissa nämä vaikutukset näkyvät selvästi ilman kylmän valtameren vaikutusta. Erotuskuvista voidaan huomata, että nousevien ratojen häiriöt ovat mitättömiä laskevien ratojen häiriöihin verrattuna.

Kuvassa 15 ovat kuvan 14 alariviä vastaavat minimin ja maksimin erotusten mediaanit V-polarisaatiosta. Kuvasta huomataan, että minimin ja maksimin erotuksen tutkiminen on V-polarisaatiossa epäkäytännöllisempi tapa tutkia radiotaajuisia häiriötä, sillä merialueilla tämä erotus on luonnostaan H-polarisaatiota suurempi. Kuitenkin kuvasta on havaittavissa RFI-lähteiden aiheuttamia impulssivasteita, joista osa on hieman eri sijainneissa kuin H-polarisaatiossa.



Kuva 14: Kirkkauslämpötilojen minimien, maksimien ja niiden erotusten mediaanit H-polarisaatiossa.



Kuva 15: Kirkkauslämpötilojen maksimien ja minimien erotusten mediaanit V-polarisaatiossa vuoden ajalta.

6 Häiriön tunnistus ja poisto

Interferometrisessa kaukokartoituksessa radiotaajuuden häiriön tunnistamisessa on otettava huomioon laitteiston rajoitukset. L1-prosessoidusta datasta häiriöt erottuvat joskus hyvinkin selvästi kuvia tarkkailemalla, mutta prosessointi L1-muotoon on vaatii laitteistolta laskentatehoa, eikä prosessointia voi näin ollen suorittaa satelliitissa reaaliaikaisesti. Lisäksi algoritmit ovat kaksiulotteista kirkkauslämpötilakarttaa käsiteltäessä monimutkaisia ja laskennan osalta raskaita.

Radiosignaalin tarkkaileminen taajuustasossa tarjoaa myös hyvät edellytykset häiriön havaitsemiseen. Näytteistettyä radiosignaalia ei kuitenkaan SMOS-satelliitissa tallenneta ja näytteenottotaajuudeltaan korkeataajuisimmat satelliitista maahan siirretyt kokonaisen signaalit ovat kustakin polarisaatiosta vuorotellen 2,4 sekunnin välein lasketut näkyvyysarvot ja kohinainjektioradiometrien jokaisella 1,2 sekunnin jaksolla mitaamat antennilämpötilat. Näytteenottotaajuus on siis vain 0,83 Hz, joka on suuruudeltaan mikroaaltoradiometriassa mitätön.

Tässä luvussa on esitelty häiriöiden tunnistamiseen tarkoitettuja menetelmiä. Menetelmät on jaettu RFI:n turmelemien kuvien ja pikseleiden tunnistamismenetelmiksi. Useissa tunnistusmenetelmissä käytetty spliniapproksimaatio esitellään alaluvussa 6.1. Kuvilla, joita käsitellään alaluvussa 6.2, tarkoitetaan tässä tapauksessa yksittäisillä integraatiojaksoilla muodostettuja kirkkauslämpötilakuvia, jotka menevät päällekkäin muiden integraatiojaksojen kuvien kanssa. Pikselit, joita käsitellään luvussa 6.3, ovat DGG-koordinaatiston maantieteellisiä pisteitä, jotka on sijoitettu kartalle. Pikselit ovat kuusikulmaisia.

6.1 Spliniapproksimaatio

Eräs tapa häiriön tunnistamiseen SMOS-satelliitissa on NIR-radiometrien mittaamien antennilämpötilojen tai kompleksisten näkyvyysarvojen tutkiminen.

NIR-radiometrien mittaamat antennilämpötilat ovat yleensä ajan suhteen hitaasti muuttuvia. Tämä johtuu antennien heikosta suuntaavuudesta. -3 dB keilat MIRAS-radiometrilaitteiston antenneissa vastaavat noin 1000 kilometrin matkaa maanpinnalla. Tämän matkan satelliitti etenee noin 150 sekunnissa. [18] Mikäli maastossa tapahtuu satelliitin näkyvyysalueella luonnollisen säteilyn mittakaavassa suuria vaihteluita, kuten siirtyminen meren yläpuolelta mantereen yläpuolelle, radiometrien mittaamalla antennilämpötilalla kestää minuutteja muuttua kylmästä arvosta lämpimään.

Mikäli antennilämpötilojen arvoista löydetään huomattavan nopeita vaihteluita, voidaan todeta, etteivät ne ole luonnollisen maastonvaihtelun aiheuttamia. Nämä muutokset ovat todennäköisemmin radiolähettimien aiheuttamien häiriöiden aikaansaamia. Kompleksisten näkyvyysarvojen tapauksessa häiriö voi olla additiivista, subtraktiivista tai näkymätöntä. NIR-antennilämpötiloissa häiriö on aina tehon suhteen additiivista.

Tässä alaluvussa esitetty algoritmi etsii NIR-radiometrien havaitsemien antennilämpötilojen aikasarjasta arvoja, jotka ovat selvästi erillään aikasarjan hitaasti muuttuvasta luonnollisesta vaihtelusta. Algoritmi perustuu spliniapproksimaatioon

ja approksimaatiovirheen mukaan säätyvään painokerroinfunktioon. Algoritmi on esitetty kokonaisuudessaan artikkelissa [18]

Splinit ovat jatkuvia paloittain kantapolynomien avulla määriteltyjä funktioita. Tässä algoritmissa käytetään B-splinejä \mathcal{S} , jotka muodostavat splinin S lineaarikombinaatiolla

$$S(t) = \sum_{k=-1}^{m+1} \alpha_k \mathcal{S}_k(t). \quad (33)$$

Käytännössä approksimaatio S näytteistä Z tuotetaan minimoimalla pienin neliösumma

$$Q(\alpha) = \sum_i \omega_i (Z(t_i) - S(t_i))^2 = \sum_i \omega_i \left(Z(t_i) - \sum_{k=-1}^{m+1} \alpha_k \mathcal{S}_k(t_i) \right)^2, \quad (34)$$

jossa kertoimet ω_i määräävät ajanhetken t_i painoarvon. Parametrin i otosjoukoksi voidaan valita esimerkiksi yhden maailmanympärikkierroksen. Algoritmista kaukana liukuvasta mediaanista olevat arvot ovat epäiltyjä häiriön korruptioimia arvoja, joten ne saavat approksimaatiossa pienen painoarvon. Jos näin ei tehtäisi, häiriön korruptioimat arvot muuttaisivat approksimaatiota kauemmas häiriöttömästä antennilämpötilasta. [18]

Algoritmi etenee seuraavalla tavalla:

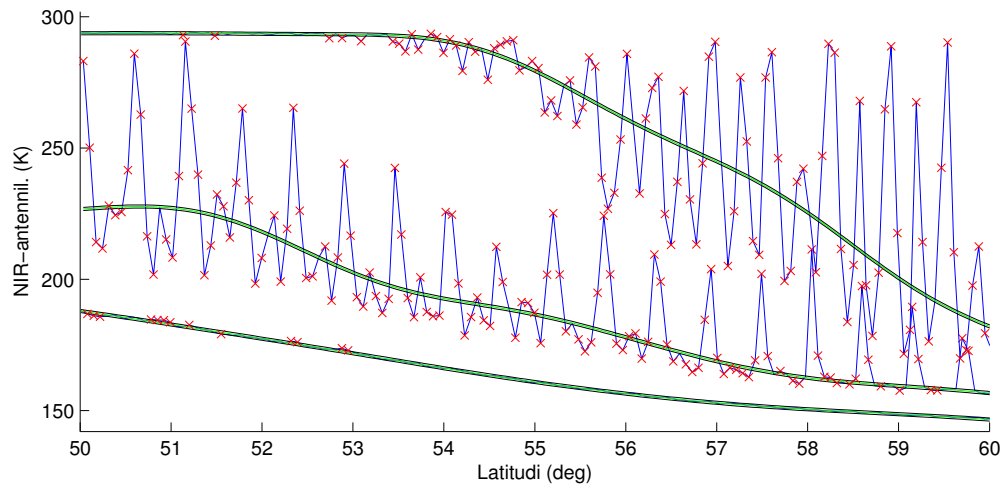
1. Alustusvaihe: Kertoimien ω määrittäminen mediaanisuodatuksella, jonka ajanhetken t_i arvot ovat t_i -keskeisten aikaikkunoiden mediaaneja.
 - (a) Mediaanideviaatiot, eli mediaanisuodatettujen näytteiden erotusten lukujono σ_i alkuperäisistä näytteistä, lasketaan.
 - (b) Painoarvot ω_i määritellään funktiolla $\omega_i = \varphi(\sigma_i)$.
2. Iteraatiovaihe.
 - (a) Kertoimien α_k määrittäminen pienimmän neliösumman $Q(\alpha)$ minimoinnilla.
 - (b) Residuaalin $r_i = Z(t_i) - \sum_{k=-1}^{m+1} \alpha_k \mathcal{S}_k(t_i)$ laskenta.
 - (c) Uusien painoarvojen $\omega_i = \varphi(r_i)$ määrittäminen.
 - (d) Palaa kohtaan (a), ja lopeta kunnes approksimaatio suppenee.

Lopuksi suoritetaan varsinainen häiriöiden korruptioimien arvojen tunnistus. Mikäli residuaalit r_i ovat itseisarvoltaan yli $3\sigma_Z$, jossa σ_Z on radiometrinen kohina (NIR-radiometrin tapauksessa 0.2 K), voidaan näyte merkitä häiriötä sisältäväksi. Tämän diplomityön ensimmäisissä tuloksissa on käytetty artikkelin [18] painoarvofunktiota $\varphi(r_i) = \sigma_Z^2 / (\sigma_Z^2 + r_i^2)$. Tämän jälkeen painokertoimia on muutettu paremmin tarkoitukseen sopiviksi.

6.1.1 Spliniapproksimaation toiminta

Tässä luvussa on tutkittu alaluvun 6.1 algoritmin toimintaa. Artikkelissa [18] esitelly algoritmi hyödyntää kohinainjektioradiometrien 1,2 sekunnin välein mittaamaa antennilämpötila-arvoa ja vertailee näitä arvoja approksimaatioon, jonka on suunniteltu vastaavan antennilämpötiloja ilman radiotaajuisten häiriöiden vaikutusta. Algoritmin avulla saatuja tuloksia häiriöiden maantieteellisestä jakautumisesta maailmanlaajuisesti pohdittiin alaluvussa 5.1.

Algoritmia on tutkittu ajamalla sitä vuoden 2010 L1a-telemetriadatasta laskeutuilla NIR-antennilämpötiloilla. Vuoden aikana satelliitti on ylittänyt Suomen yhteensä 510 kertaa, 255 kertaa nousevilla radoilla ja 255 kertaa laskevilla radoilla. Näistä lennoista on valikoitu kuvaan 16 kolmen nousevan ylilennon antennilämpötilat latitudin funktiona. Kuvan latitudeilla $50^\circ - 60^\circ$ satelliitti on Baltian maiden yllä kohtaamassa Suomea.



Kuva 16: Kolmen ylilennon NIR-antennilämpötilat (sininen viiva) latitudin funktiona, niiden spliniapproksimaatio (vihreä viiva, RFI-merkinnän marginaalialueet (musta viiva) ja RFI-merkinnät (punaiset rastit).

Kuvassa 16 on antennilämpötilat esitetty sinisellä käyrällä. Vihreä käyrä edustaa spliniapproksimaatiota ja vihreän käyrän kummallakin puolella kulkevat RFI-vapaan NIR-kohinan keskihajontaan perustuvat 0.6 K marginaalit, joiden yli mennessään antennilämpötila voidaan katsoa RFI:n häiritsemäksi. Punaisilla rasteilla on merkitty kaikki antennilämpötila-arvot, jotka algoritmi on merkinnyt marginaalin ylittäneeksi.

Käyristä alin edustaa ylilentoa, jolla radiotaajuisia häiriötä on hyvin vähän. Antennilämpötilat pysyvät koko käyrän loppuosan ajan täysin marginaalien sisällä, eikä algoritmi täten ilmoita radiotaajuisesta häiriöstä. Käyrän alkuvaiheessa on muutama marginaalinylititys, joka johtuu antennilämpötilan vaihtelun lisäksi osittain siitä, että 0.6 K marginaali on hyvin tiukka. Kuten luvussa 5.1 nähtiin, satunnaisia rajanylityksiä nähdään myös valtamerialueilla, joilla RFI:n määrä on mitätön.

Käyristä keskimmaisessa on havaittavissa Suomen yllä voimakkuudeltaan tyyppillistä häiriötä. Häiriö on suhteellisen jaksollista impulssijonoa, jossa piikkien korkeus on yli 30 kelviniä. Tällainen häiriö on usein tutkien aiheuttamaa. Algoritmi toimii kohtalaisesti käyrän loppupuolella; spliniapproksimaatio sijoittuu lähelle käyrän alemmaa verhoikäyrää, jossa häiriövapaan signaalin tason oletetaan olevan, koska häiriö on tehon suhteen additiivista eli se vaikuttaa tehoon positiivisella lisäyksellä. Spliniapproksimaatio ei kuitenkaan missään vaiheessa ole täysin lämpötilakäyrän alarajalla, minkä vuoksi myös negatiivisia marginaalinyhtymänsä on kaikilla longitudineilla. Mikäli piikit olisivat harvemmassa, algoritmi toimisi paremmin. Käyrän alkuosassa piikit ovat niin tiheitä, että splinikäyrä saturoituu keskelle kohinaista signaalia, eikä näin ollen toimi halutulla tavalla.

Ylin käyrä edustaa algoritmin kannalta ongelmallisinta tilannetta. Käyrän alkuosalla häiriö on niin voimakasta, että se ylittää NIR-radiometrin antennilämpötila-alueen ylärajan, joten se saturoituu arvoon 293 kelviniä. NIR-radiometrin mittausdynamiikan teoreettinen yläraja on radiometrin fyysinen lämpötila. Tällöin rekisteröity signaali pysyy tiukasti tuossa arvossa, eikä häiriölle tyyppillistä arvojen voimakasta vaihtelua havaita. Algoritmi ei myöskään merkitse tällaisessa tapauksessa ainuttakaan arvoa häiriöiksi. Käyrän jälkipuolella suurta vaihtelua tapahtuu, mutta spliniapproksimaatio ei kykene approksimoimaan kuvaajassa huomattavasti alempana kulkevaa RFI-vapaata antennilämpötilaa.

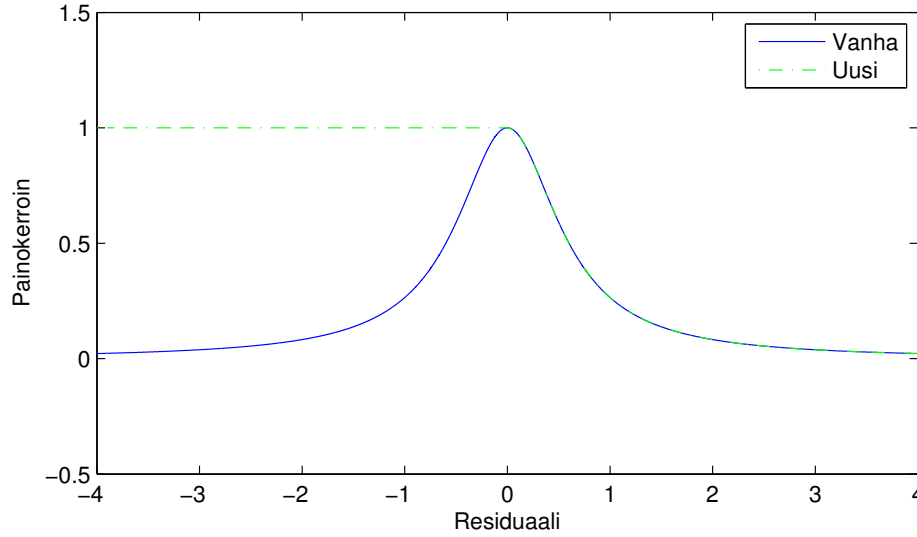
Ideaalitapauksessa algoritmi toimisi siten, että impulssijonomaisen häiriön tapauksessa ainoastaan RFI-impulssien kohdalta tulisi häiriömerkinnät. Tämä helpotaisi kirkkauslämpötilakuvien muodostamista, sillä kuvia ei tarvitsisi tällöin muodostaa niiltä ajanjaksoilta, joiden olisi jo NIR-antennien avulla toimivan algoritmin avulla todettu olevan häiriöisiä. Tämä vaatisi algoritmiin sellaisia muutoksia, jotka hyödyntävät tietoa siitä, että häiriöt tehoon ovat additiivisia. Myöskään lämpötilojen saturoituminen maksimiarvoonsa ei ideaalisessa algoritmista estä häiriömerkintöjen tekemistä. Tämä on korjattavissa yksinkertaisesti lisäämällä algoritmiin maksimikirkkauslämpötila, jonka ylittäessä kirkkauslämpötila luokiteltaisiin automaattisesti RFI-häiriöiseksi, sillä 293 kelviniä on selvästi luonnollisen maan emission aiheuttaman kirkkauslämpötilan yläpuolella.

Algoritmin kaksi ongelmakohtaa siis ilmenevät voimakkaan RFI:n tapauksessa. Ongelmia aiheuttivat sekä maksimiarvoon saturoituminen että algoritmin tuottamien arvojen suppeneminen liian korkealle tasolle. Pienen RFI-määrän tapauksessa algoritmi toimii melko hyvin.

6.1.2 Painokerrroinfunktion valinta

Luvussa 6.1 esitetty algoritmi on sopiva työkalu radiotaajuisen häiriön etsimiseen NIR-kohinainjektioradiometrien avulla tuotetuista antennilämpötila-aikasarjoista. Algoritmia testattaessa toiminnasta löytyi kuitenkin puutteita, jotka pahimmissa tapauksessa merkitsivät sitä, että jokainen RFI-merkintä on virrehälytys (kuvan 16 ylemmät tapaukset). Toimintapuutteiden vuoksi algoritmia on säädettävä suorituskäytännöksi.

Kuten aiemmin on kerrottu, pahimmat algoritmin puutteet liittyvät RFI:n te-



Kuva 17: Algoritmin painokerroinfunktion uudistus.

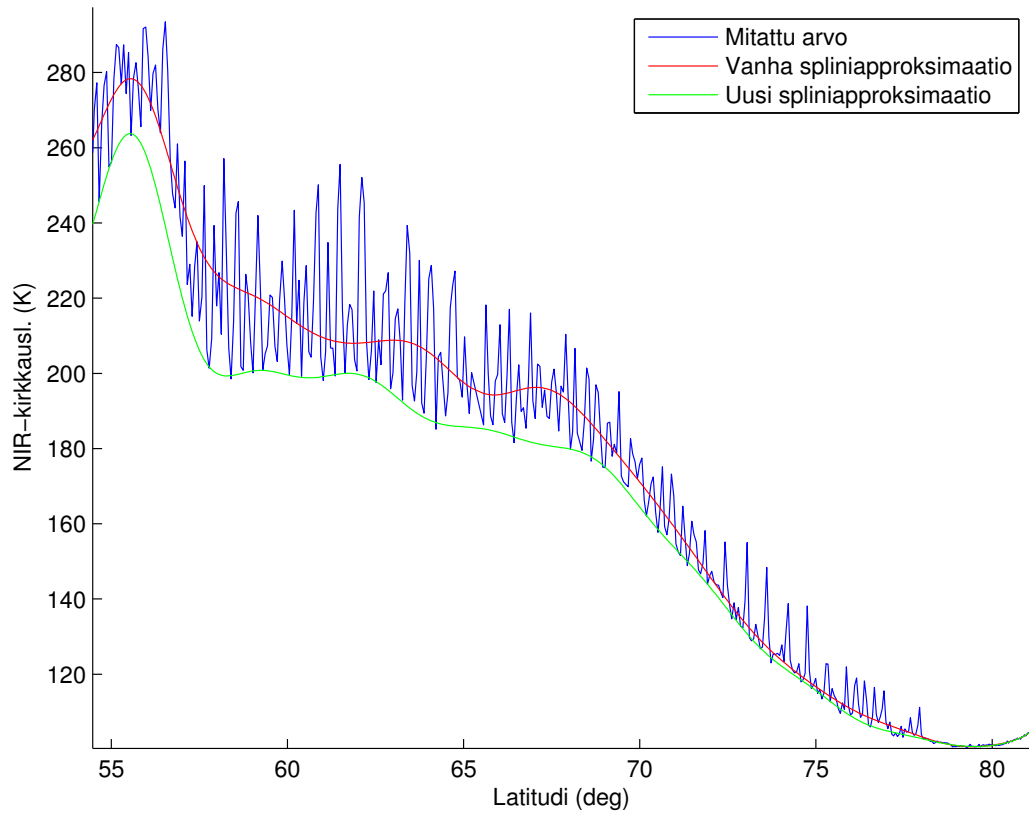
hoadditiivisuuteen, jota algoritmi ei artikkelin [18] esittämällä iteraatiovaiheen 2 c) painokertoimella $\varphi(r_i) = \sigma_\star^2 / (\sigma_\star^2 + r_i^2)$ ota huomioon. Painokertoimen tarkoituksena on siirtää spliniapproksimaatiota painottumaan tarkemmin niihin arvoihin, joita lähellä splini on ollut edellisellä kierroksella. Tällöin splini suppenee lähelle kirkkasulämpötila-aikasarjan keskiarvoa. Tällaisessa tapauksessa painokertoimet pienentävät mitattujen arvojen painoa myös siinä tapauksessa, että mitatut antennilämpötila-arvot ovat spliniapproksimaatiota pienempiä.

Diplomityön teon yhteydessä kehitellyllä pienellä korjauksella painokertoimiin pyritään saamaan parannusta tuloksiin. Uusissa painokertoimissa painotus ei rankaise iteraatiokierrosten approksimaatiota pienempiä antennilämpötila-arvoja antamalla niille pienemmän painokertoimen, vaan painokerroin pysyy samana spliniapproksimaatiota pienemmillä arvoilla. Uudet kertoimet määritellään seuraavasti:

$$\begin{cases} \varphi(r_i) = \sigma_\star^2 / (\sigma_\star^2 + r_i^2) \\ 1, & r_i < 0. \end{cases} \quad (35)$$

Kaava on esitetty kuvaajana kuvassa 17, jossa uudistettu painoarvofunktio on esitetty vihreällä katkoviivalla ja artikkelin [18] painokerroin sinisellä yhtenäisellä viivalla.

Kuvassa 18 on esitetty approksimaation sijoittuminen uudella ja vanhalla painokerroinfunktiolla eräällä Suomen yli tehdylä laskevalla radalla. Kuvasta huomataan, että vihreänä esitetty uudistettu approksimaatio sijoittuu tarkalleen kohinaisen antennilämpötilafunktion alaverhokäyrälle, jota voidaan pitää melko hyvänä approksimaationa RFI-vapaasta antennilämpötilatasosta. Sen sijaan vanha symmetrinen funktio esittää approksimaatiotason antennilämpötilan huomattavasti korkeammalle, jolloin sen alapuolelle jää paljon mitattuja antennilämpötila-arvoja. Algoritmin ajaminen uudelleen uusituilla painokertoimilla osoitti siis uudistuksen toimineen.



Kuva 18: Spliniapproksimaation toiminta muunnetulla painokerroinfunktiolla.

Spliniapproksimaatio on vain yksi mahdollinen vaihtoehto RFI-vapaiden antennilämpötilojen approksimoimiseen. Käytännössä tässä tarkoituksessa toimisivat myös muutkin muutoksentunnistus- ja suodatusmenetelmät, esimerkiksi epälineaariset suodattimet. Spliniapproksimaatiosta voidaan todeta sen olevan riittävän hyvin toimiva tämän diplomityön tutkimukseen, vaikka myös paremmin toimivia algoritmeja olisi mahdollista suunnitella. Myöskään tähän asti tutkituista lähdeaineistoista ei ole löydetty viitteitä muihin NIR-radiometrien antennilämpötilajonoihin käytettyistä approksimaatiomenetelmistä.

6.2 Pällekkäisten kuvien valikointi

L1c-tasossa kirkkauslämpötilat on jaettu karttapisteisiin. Yhden ylilennon aikana yhteen karttapisteeseen kertyy eri integraatiojaksoilta useita kirkkauslämpötilamittauksia. Koska jotkut RFI-lähteet vaikuttavat kirkkauslämpötiloihin lyhyinä impulsseina, on selvää, että joissakin saman karttapisteen kirkkauslämpötila-arvossa RFI:n haitallista vaikutusta on enemmän ja joissakin vähemmän. Koska yhteen karttapisteeseen saattaa löytyä kymmeniä eri kohtauskulmilla mitattuja kirkkauslämpötila-arvoja, on niiden jatkokäsittelyyn ottamisella valinnanvaraa. Voidaan siis valita mu-

kaan ainoastaan arvot niiltä ajanhetkiltä, joilla on todettu olevan vähän radiotaajuisia häiriöitä. Tässä alaluvussa tutkitaan erilaisia valikointikriteereitä sopivilta ajanhetkiltä peräisin olevien kuvien poistoon.

6.2.1 Kiinteämarginaalinen suodatus splinin avulla

Poistettavien L1c-kuvien valikointiin voidaan käyttää esimerkiksi aiemmin käsitellyjä NIR-antennilämpötila-arvoja, jotka kuuluvat alemman datatason tuotteisiin. NIR-antenneilla tehomittausjaksot ovat samoja kuin L1c-tasolla olevat yksittäisten kuvien integraatiojaksot. Luvussa 6.1 esitetty algoritmi on menetelmä, jota voidaan L1c-kuvien valikointiin. Menetelmässä antennilämpötiloista muodostetaan spliniapproksimaatio ja vertaillaan sitä alkuperäisiin antennilämpötiloihin. Mikäli antennilämpötilan arvo on yli marginaaliarvon verran suurempi kuin splini, ajanhetki merkitään häiriöiseksi. Marginaaliarvona on käytetään tässä työssä aliluvussa 6.1 esitettyä $3\sigma_Z = 0,6K$

Tiukoilla merkintämarginaaleilla algoritmi ei kuitenkaan sovellu poistomenetelmäksi suurimmilla häiriötasoilla, koska aikajaksoilla, joilla häiriötä on paljon, ei jäisi poiston jälkeen jäljelle juuri lainkaan kuvia. Myöskään marginaalien laajentaminen ei sellaisenaan toimi ylilennoilla, joilla häiriön voimakkuus vaihtelee. Rajan valinnan mukaan joko suurihäiriöiset alueet jäävät kokonaan ilman arvoja tai lievä häiriö jää huomioimatta.

6.2.2 Muuttuvamarginaalinen suodatus splinin avulla

Eräs vaihtoehto on käyttää ehdottoman rajan sijasta vaihtuvaa marginaalia. Tällaisen rajan voi tuottaa esimerkiksi mediaanisuodatuksella. Jos antennilämpötilan ja siitä tehdyn spliniapproksimaation erotus on suurempi kuin ympäröivien vastaavien erotusten mediaani, ajankohdalla otettu kuva voidaan merkitä poistettavaksi. Tällöin aikaikkunalta valitaan poistettaviksi muuta aikaikkunaa huonoimmiksi todetut kuvat.

Kuvassa 19(a) on esitetty sinisellä NIR-antennilämpötila, mustalla splini, punaisilla rasteilla poistettavaksi merkityt kuva-ajankohdat sekä vihreällä poiston jälkeen jäljelle jäänyt NIR-antennilämpötilakäyrä. Kuvassa on käytetty 19 näytteen mediaani-ikkunaa. Kuvasta nähdään, että poistettavia kuvia on lähes kaikilla aika-väleillä lähes yhtä paljon kuin jäljelle jätettyjä arvoja, mikä kertoo siitä, että menetelmä valitsee parhaat 50 prosenttia mukaan riippumatta siitä kuinka voimakasta RFI on. Tämä ei kuitenkaan ole aina haluttua, sillä esimerkiksi longitudeilla 80-82 astetta poistetaan myös kuvia sellaisilta ajanhetkiltä, joissa ei käyrän perusteella ole havaittavissa RFI:tä. Toisin sanoen, myös hyviä kuvia heitetään hukkaan ja todellisten maanpinnan kirkkauslämpötilojen estimointi muuttuu myöhemmin epätarkemmaksi.

6.2.3 Mediaanisuodatus

Vaikka edellisessä valintamenetelmässä oli käytetty RFI-vapaata NIR-antennilämpötilaa approksimoivaa spliniapproksimaatiota, myös yksinkertaisempi menetelmä on

osoittautunut kelvolliseksi. Menetelmässä käytetään ainoastaan antennilämpötilanäytejonon vertailua sen liukuvaan mediaaniin. Tällä kertaa ajanhetkellä oleva kuva merkitään poistettavaksi ainoastaan silloin, kun sitä vastaava NIR-antennilämpötila-arvo on suurempi kuin sen molemmille puolille symmetrisesti asetetun aikaikkunan arvojen mediaani.

Kuvasta 19(b) nähdään, että menetelmä merkitsee ajanhetkiä hyvin samaan tapaan kuin spliniä hyödyntävä menetelmä. Lähes ainoa poikkeus löytyy osuudelta, jolloin muutokset ovat vähäisiä, toisin sanoen ajanhetkillä ei ole radiotaajuista häiriötä. Tällaisilla alueilla mediaaniksi valikoituu suurella todennäköisyydellä vertailtavan arvon itsensä antennilämpötila-arvo. Koska vertailu mediaaniin valikoi ainoastaan mediaania suuremmat arvot eikä yhtäsuuria arvoja, RFI-vapaalta lähes kaikki arvot merkitään säilytettäväksi. Tästä on hyötyä, mikäli halutaan parantaa RFI-vapaan alueen antennilämpötilatarkkuutta jättämällä useampia arvoja näiltä aikaväleiltä.

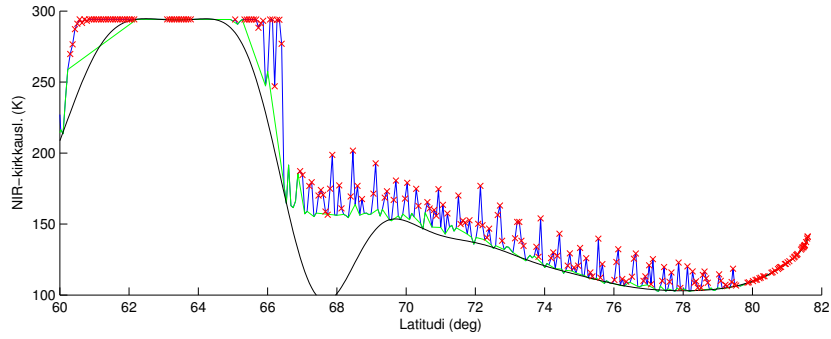
6.2.4 Korkeiden antennilämpötilojen leikkaus

Tässä luvussa esitettyjä spliniä tai mediaania hyväksikäyttävää valintamenetelmää voidaan vielä muuttaa sellaiseksi, että epäluonnollisen korkeat NIR-antennilämpötilat karsitaan pois. Kuvassa 19(c) on esitetty valintakristeeri, joka merkitsee liukuvaan mediaanin ylitysten lisäksi myös 270 K antennilämpötilan ylitykset poistettaviksi. Tällä rajalämpötilalla ei ole juurikaan muuta väliä kuin se, että se leikkaisi 297 kelviiniin saturoituneet integraatiojaksot pois, eikä leikkaa luonnollisia, alle 230 kelvinin antennilämpötiloja. Kuvien kirkkauslämpötilat näillä ajanhetkillä ovat hyvin suurella todennäköisyydellä käyttökelvottomia. Tämän menetelmän huonona puolena on se, että joistakin karttapisteistä saattaisi jäädä kaikki integraatiojaksot pois, mikäli voimakas RFI-lähde vaikuttaa mittaukseen pitkän ajan. Tällöin näiltä alueilta ei saataisi minkäänlaista tieteellistä informaatiota. Toisaalta, jos nämä korruptoituneet karttapisteet otettaisiin mukaan, niistä ei olisi juurikaan hyötyä, sillä niissä olisi häiriön vuoksi virheellinen kirkkauslämpötila, josta ei ole tieteellistä hyötyä esimerkiksi meteorologiassa.

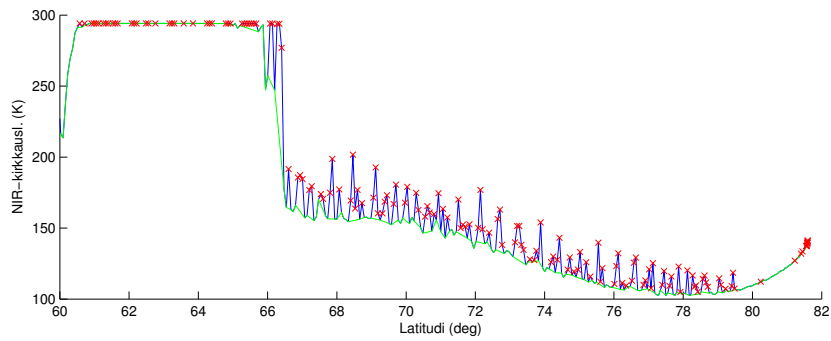
6.2.5 Kokonaisten kuvien poisto yksittäisistä pikseleistä saadulla informaatiolla

Kokonaisia kuvia voidaan poistaa myös tarkkailemalla yksittäisiä pikseleitä. Mikäli kuvan jossakin pikselissä kirkkauslämpötila poikkeaa pikselin keskiarvosta jonkin, esimerkiksi keskihajontaan verrannollisen kynnsarvon verran, voidaan tämän kirkkauslämpötila-arvon sisältävä kirkkauslämpötilakuva kokonaan poistaa.

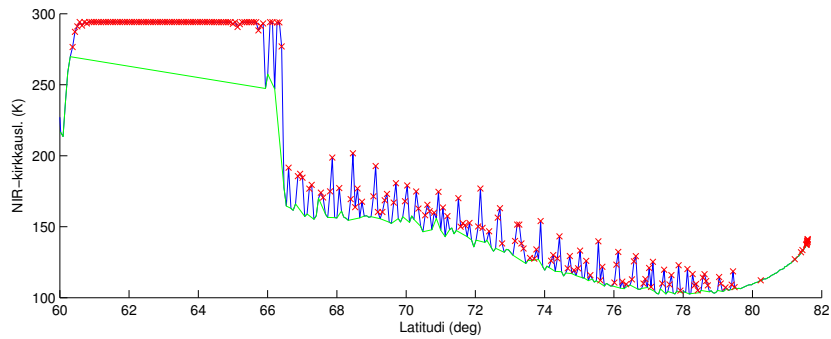
Tässäkin menetelmässä on riskejä. Jokainen kirkkauslämpötilakuva sisältää myös pienen kohtauskulman kirkkauslämpötila-arvoja. Nämä arvot vaihtelevat usein rajusti, etenkin maa- ja vesialueiden rajoilla. Pienten kohtauskulmien pikselit voivat aiheuttaa tällöin myös hyvien kuvien poistoja. Pahimmassa tapauksessa tästä saatetaan aiheutua se, että yhtään kuvaa ei jää ylilennolta jäljelle.



(a) NIR-antennilämpötilojen spliniapproksimaatiota hyödyntävä poistovalikointimenetelmä muuttuvalla marginaalilla.



(b) Mediaaniin perustuva poistovalikointimenetelmä.



(c) Mediaaniin perustuva poistovalikointimenetelmä liiean korkeiden NIR-antennilämpötilojen merkintään perustuvalla leikkauksella.

Kuva 19: Poistettavaksi valikoitavien ajanhetkien valikointimenetelmiä. Sinisellä NIR-antennilämpötilat, mustalla spliniapproksimaatio ja vihreällä antennilämpötilakäyrä ilman punaisella merkittyjä RFI-merkintöjä.

6.3 Pikselien valikointi

Kokonaisten integraatiojaksojen häiriöiden tunnistuksen lisäksi ylilentoja voidaan tarkastella myös toiselta ulottuvuudelta. Kokonaisten ajanhetkien sijasta voidaan häiriöiden turmelemiksi valita yksittäisiä DGG-pikseleitä. Tästä on eniten hyötyä varsinkin silloin, kun RFI-lähde on pysyvä eli sen voimakkuus ei vaihtelee ajanhet-

kestä toiseen. Kokonaisten ajanhetkien merkintä toimii impulssimaisesti vaikuttaviin tutkahäiriöihin, mutta staattisiin häiriöihin NIR-antenneihin perustuva ajanhetki-valinta ei sovellu.

Kuvan kokonaislaadun parantamisen sijasta huonojen pikselien valikoinnilla on hyötyä kuvien tieteellisen käytön kannalta. Häiriöiset pikselit voidaan tunnistaa etukäteen, minkä jälkeen ne voidaan jättää huomioimatta, jotta esimerkiksi meteorologit eivät tekisi vääristyneitä tulkintoja säästä ja maaperästä.

6.3.1 Keskihajontaan perustuva valikointi

Kuten on aiemmin todettu, suuri hajonta yksittäisten pikseleiden kirkkauslämpötiloissa on merkki mahdollisesta radiotaajuisesta häiriöstä. Koska luonnollisen säteilyemission muutos kulman funktiona on seuraavassa luvussa esiteltyjen emissiomallien perusteella kymmenien kelvinien luokkaa, tätä suuremmat vaihtelut ovat hyvin todennäköisesti häiriöiden aiheuttamia.

Keskihajonta on eräs tähän tarkoitukseen sopiva parametri. Suuren keskihajontan pikselit voidaan hylätä, sillä niiden avulla saatava tieteellinen informaatio voi olla harhaanjohtavaa.

Ainoana valittavana parametrina on kynnysarvo, jonka ylittävä keskihajonta-arvo merkitsee pikselin korruptoituneeksi. Liian pieni kynnysarvo saattaa tuottaa vääriä hälytyksiä ja liian suuri arvo päästää läpi selvästi turmeltuneita pikseleitä. Myös erilaisten maa-alueiden emission voimakkuus vaikeuttaa tunnistusta, sillä eri alueiden luonnollinen keskihajonta vaihtelee kummallakin polarisaatiolla.

6.3.2 Minimien ja maksimien erotukseen perustuva valikointi

Keskihajontaan perustuvaa pikselien valikointia herkempi RFI-tunnistuskeino on kirkkauslämpötilojen minimien ja maksimien tutkiminen. Näiden erotus ilmaisee herkästi, jos pikselissä on jonakin ajanhetkenä kirkkauslämpötila ollut hyvin poikkeava. Tämä keino tunnistaa RFI:n erittäin tehokkaasti, mutta on herkkä myös vääriin hälytyksille, sillä yksittäinen huono mittausta kymmenien muiden hyvien joukossa voi merkitä pikselin huonoksi.

Menetelmän haittapuolena on se, että varsinkin pienellä kohtauskulmalla kirkkauslämpötilat saattavat heitellä rajusti ja tällöin myös minimien ja maksimien erotus saattaa kasvaa, vaikka isolla kohtauskulmalla mittaukset olisivat hyviä.

7 Tunnistus- ja poistomenetelmien vertailu Suomen alueella

7.1 Testiaineisto

Tämän diplomityön radiotaajuisten häiriöiden tutkimisessa on käytetty SMOS-satelliitin dataa vuodelta 2010. Käytössä on kaikki data kyseiseltä vuodelta L0-L1c tasolta. Resurssien puutteesta mukaan on kuitenkin valikoitu vain osa tästä datasta.

L1a-tason telemetriadata on kooltaan varsinaisia tieteellistä dataa pienempää, joten se soveltuu NIR-radiometrien antennilämpötilojen keräämiseen. Luvun 6.1 algoritmi on ajettu vuoden 2010 loka-joulukuun ajalta ja merkityt RFI-pisteet on esitetty kuvissa 11(a) ja 11(b). Koko vuoden ajalle algoritmi on ajettu ylilennoille, joilla SMOS on ylittänyt latitudien $60^{\circ} - 70^{\circ}$ sekä longitudien $20^{\circ} - 30^{\circ}$ välisen alueen (kuvissa 13-16), eli Suomea ympäröivät koordinaatit. Näiden ylilentojen avulla on laskettu alaluvussa 6.2 poistettaviksi merkittävien integraatiojaksojen poistoja.

L1c-tason data vie kovalevytilaa ja sen nopea prosessointi vaatii laskentatehoa, joten L1c-dataa on valikoitu pienempi otos. Mukaan on valikoitu nousevilta ja laskevilta radoilta noin 18 vuorokauden välein tapahtuvia ylilentoja, joiden aikana satelliitti ylittää Suomen lähes samasta kohdasta samaan aikaan päivästä. Mukana on 14 laskevaa ja 12 nousevaa ylilentoa, joiden aikana satelliitissa oli käytössä täysipolarimetrinen tila. Ylilennot on lueteltu liitteessä A. Osa näistä ylilennoista oli lähes kokonaan radiotaajuisen häiriön korruptioimia, joten näistä vain viisi nousevaa ja viisi laskevaa vähiten RFI:tä sisältävää ylilentoa analysoitiin. Myös nämä ylilennot on lueteltu liitteessä A. Paljon häiriöitä sisältävän ylilennon tutkiminen ei ole hyödyllistä, sillä tällaisesta datasta ei saada juuri mitään hyötyä satelliitin varsinaisesta käyttötarkoituksesta. Paljon RFI:tä sisältävistä kuvista ei häiriöitä ole mahdollista saada poistettua kokonaan, jotta kuvat olisivat käyttökelpoisia.

7.2 Vertailtavat tunnistus- ja poistomenetelmät

Tämän luvun lopussa vertaillaan erilaisia radiotaajuisten häiriöiden poistovalikointimenetelmiä. Vertailtavat menetelmät ovat luvussa 6 esitettyjä. Vertailussa suoritetaan pikselin- ja kuvanpoistoja viidelle laskevalle radalle ja viidelle nousevalle radalle Suomen alueella. Vertailtavana ovat splinimenetelmä alaluvussa 6.1.2 esiteltyllä painokerroinfunktiolla, splinimenetelmä mediaaniin perustuvalla valikoinnilla, medianisuodatusmenetelmä, keskihajontaan ja minimin sekä maksimin erotukseen perustuvat pikselivalikointimenetelmät, sekä pikseleiden kirkkauslämpötilahajontaan perustuva kuvanpoistomenetelmä.

7.3 Korjauksen hyvyyden tunnusluvut

Koska häiriöiden tunnistus- ja poistomenetelmiä testataan tässä automatisoidusti useille ylilennoille, ei niiden toimintaa kannata tarkastella ainoastaan silmämääräisesti. On kehitettävä menetelmiä, jotka kertovat ylilennon hyvyyden RFI:n osalta numeerisessa muodossa.

Koska tekijöitä, kuten maan fyysisen lämpötilan vaihtelu, erilaiset maastomuodot ja erityyppiset häiriöt, on paljon, on mahdotonta tehdä mittaria, joka indikoi RFI:n luotettavasti. Tämän vuoksi on L1c-kuvia tutkittava monesta näkökulmasta ja tehtävä useita hyvyyden tunnuslukuja. RFI:n todellista vaikutusta ei usein edes näe L1c-kuvista, vaan haitat ovat varmemmin huomattavissa korkeammilla datatasoilla. Tässä diplomityössä ei edetä L1-tasoa ylemmäs.

7.3.1 L1c-datan keskimääräinen keskihajonta ja keskiarvo

Keskihajonta on esitetty aiemmin hyvänä RFI-tunnistusmenetelmänä. Tämän vuoksi se soveltuu myös mittaamaan kokonaisen ylilennon häiriöiden määrää Suomen alueella. Mikäli valitaan alue latitudien $60^\circ - 70^\circ$ sekä longitudien $20^\circ - 30^\circ$ välillä ja lasketaan tämän alueen pikselien keskihajonnasta keskiarvo, saadaan aikaiseksi kelvollinen mittari kertomaan kuinka paljon RF-häiriöitä Suomessa on kyseistä ylilentoa häiritsemässä. N:stä pikselistä koostuvan kartan keskimääräinen keskihajonta on tällöin

$$\mu_{std} = \frac{\sum_{i=1}^N s_\theta(T_{Bi}(\theta))}{N}, \quad (36)$$

missä $T_{Bi}(\theta)$ on pikselin i kirkkauslämpötila kohtauskulmalla θ ja s_θ on keskihajonta kaikkien kulmien θ yli.

Kun vertaillaan RFI-poistomenetelmiä, voidaan tätä keskihajonnan keskiarvoa käyttää validoimaan poiston tehokkuutta. Tämä voidaan tehdä sekä integraatiojaksojen että pikselien poistolle. Keskihajonnan sijasta voidaan myös tarkastella keskimääräistä keskiarvoa

$$\mu_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_\theta(T_{Bi}(\theta))}{N} \quad (37)$$

eri kulmilla mitatuista pikselien kirkkauslämpötiloista, missä μ_θ on eri kohtauskulmilla mitattujen kirkkauslämpötilojen keskiarvo.

7.3.2 L1c-datan min-max -erotus

Myös pikselien minimien ja maksimien erotuksista voidaan laskea keskiarvo Suomen alueella. Tämän arvon pieneminen kertoo tässäkin tapauksessa siitä, että poisto on vaikuttanut dataan siten, että RFI:n vaikutus on pienentynyt. Erotuksen lisäksi myös pelkkää maksimiarvoa voidaan käyttää ylilennon hyvyyden mittaamisessa, sillä koholla olevat pikselien maksimikirkkauslämpötilat viittaavat häiriöihin. Erotus voidaan esittää muodossa

$$\mu_{maxmin} = \frac{\sum_{i=1}^N [\max_\theta(T_{Bi}(\theta)) - \min_\theta(T_{Bi}(\theta))]}{N} \quad (38)$$

ja maksimi

$$\mu_{max} = \frac{\sum_{i=1}^N \max_\theta(T_{Bi}(\theta))}{N}. \quad (39)$$

7.3.3 Peltoemissiomalliin sovitettu keskineliövirhe

Koska pikselin kirkkauslämpötilojen vaihtelut eivät riipu pelkästään RFI:stä, vaan myös kohtauskulmasta [15], kannattaa tämäkin ottaa huomioon. Manneralueiden emissiomallit eroavat toisistaan kuitenkin alueen tyypistä riippuen. Esimerkiksi pelto-, metsä-, kaupunki- ja suoalueilla kirkkauslämpötilan kulmariippuvuus on erilainen. Tämän vuoksi asiaa tulee tarkastella pienellä homogeenisellä alueella. Tutkittavaksi on valittu neliönmuotoinen alue Kurikasta (kuvan 20 maa-alueella oleva punainen neliö), jossa on huomattavan paljon peltoja. Peltoalueilla emission voimakkuus riippuu metsiä voimakkaammin kohtauskulmasta.



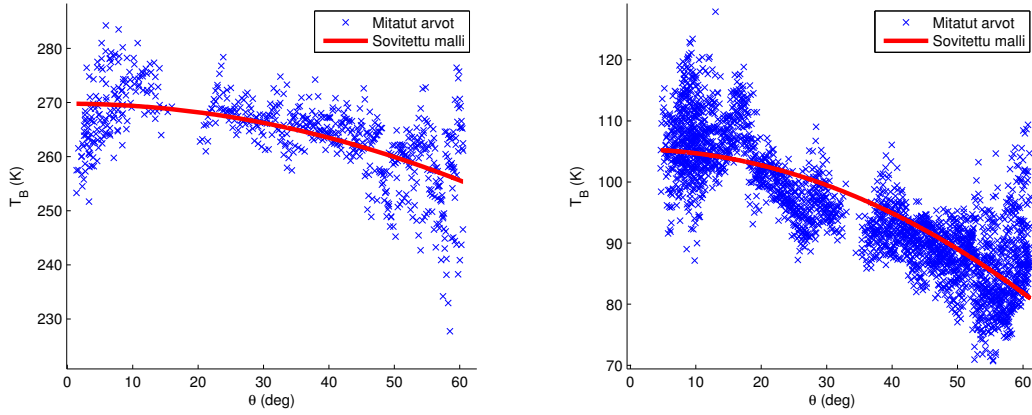
Kuva 20: Emissiomalliin perustuvan RFI-tunnistusmenetelmän testialueet Kurikassa ja Pohjanmerellä.

Tässä vertailussa kulmariippuvuuden on oletettu olevan toisen asteen polynomi. Jokaiselta ylilennolta tarkastellaan tiettyä peltoaluetta Kurikassa. Alueeseen osuvista pikseleistä kerätään kirkkauslämpötilat kohtauskulman funktiona ja siihen sovitetaan toisen asteen polynomi pienimmän neliösumman menetelmällä, kuten kuvassa 21(a). Polynomi on y-akselin suhteen symmetrinen, eli sen ensimmäisen asteen kerroin on 0. Hyvyyden tunnusluku on tällöin

$$\varepsilon_{\text{maa}} = \frac{\sum_{i \in A_1} (T_{Bi}(\theta) - p(\theta))^2}{N_{A_1}}, \quad (40)$$

jossa p on pienimmän neliösumman polynomiapproksimaatio, A_1 kuvaan 20 merkitty maa-alue ja N_{A_1} alueella olevien pikseleiden lukumäärä, joka on tämän alueen tapauksessa 5. Näihin pikseleihin osuu tyypillisesti noin 140 mittausta eri kulmilla.

Mitattuja kirkkauslämpötila-arvoja voidaan verrata approksimaatiokäyrään. Tällöin keskineliövirhe kuvaa RFI:n määrää tällä alueella. Uusi approksimaatio tehdään myös poiston jälkeen.



(a) Emissiomallin approksimaatio kuvan 20 maa-alueelle. (b) Emissiomallin approksimaatio kuvan 20 maa-alueelle.

Kuva 21: H-polarisaation emissiomittaukset kohtauskulman funktiona. Sinisillä rasteilla mitatut arvot ja punaisella viivalla pienimmän neliösumman polynomiapproksimaatio. Kirkkauslämpötilat ovat eri skaalassa.

7.3.4 Meriemissiomalliin sovitettu keskineliövirhe

Koska satelliitin on tarkoitus tutkia maanpinnan lisäksi myös merialueita, tulee emissiomalliin perustuva vertailu tehdä merialueellekin. Merialueella on hieman eri emissiomalli [16], mutta sama toisen asteen polynomiapproksimaatio ja keskineliövirhemenettely tehdään erikseen myös merialueelle kaavalla

$$\varepsilon_{\text{meri}} = \frac{\sum_{i \in A_2} (T_i(\theta) - p(\theta))^2}{N_{A_2}}, \quad (41)$$

jossa A_2 on kuvan 20 testialue merellä. Alueella on 20 DGG-pikseliä, joissa on kaikissa noin 140 mittausta eri kulmista.

Koska merialue esimerkiksi Pohjanmerellä on laaja ja pinnaltaan sekä emissioltaan homogeeninen, voidaan valita isompi alue tarkasteltavaksi (kuvan 20 merialueella oleva punainen neliö). Tällöin myös kirkkauslämpötila-arvoja saadaan mukaan enemmän. Kuvassa 21(b) vastaava polynomiapproksimaatio. Kuvasta nähdään, että mittauksia on maa-alueeseen nähden enemmän, koska alue on pinta-alaltaan isompi. Suurimmat hajonnat ovat sekä pienillä että suurilla kohtauskulmilla.

7.4 Vertailun tulokset

Luvun 6 radiotaajuisten häiriöiden poistomenetelmiä on tässä alaluvussa tutkittu luvun 7 RFI:n määrää kuvaavien tunnuslukujen avulla ja tulokset on esitetty taulukoissa 1 ja 2. Tuloksissa on käytetty viittä nousevaa ja viittä laskevaa ylilentoa, jotka on lueteltu liitteessä A. Taulukoiden yläriveissä on lueteltu käytetyt kuvien tai pikseleiden poistomenetelmät, joihin niiden alla olevien sarakkeiden lukuarvot viittaavat.

Taulukoiden vasemmissa sarakkeissa on lueteltu käytetyt RFI:n määriä kuvaavat tunnuslukujen symbolit ja nimien alapuolella on esitetty suluissa näiden tunnuslukujen keskiarvot ennen poiston suorittamista. Tunnuslukujen riveillä olevat prosenttiarvot kuvaavat sitä, kuinka paljon tämä viiden ylilennon tunnusluvun keskiarvo on muuttunut poiston yhteydessä. Kahdella alarivillä on ilmoitettu kuinka suuri osa kuvista tai pikseleistä on operaatiossa poistettu.

Tunnuslukujen prosenttiarvot ovat menetelmien mukaan negatiivisia silloin, kun poisto on tuottanut muutosta parempaan suuntaan. Mitä pienemmäksi tunnusluku on muuttunut, sitä vähemmän radiotaajuista häiriötä on jäänyt jäljelle. Käytännössä suuria negatiiviseen suuntaan tapahtuneita muutoksia havaitaan myös epäonnistuneissa poistoyrityksissä, esimerkiksi silloin kun lähes kaikki kirkkauslämpötilat on poistettu joistakin pikseleistä.

Ensimmäiseksi esitetty luvun 6.1 spliniin perustuva tunnistusmenetelmä (taulukossa nimellä splini) näytti toimivan lähes halutulla tavalla. Menetelmässä oli käytetty alaluvun 6.1.2 paremmin toimivaa painokerroinfunktiota, 0,6 K marginaalia splinin ylittävälle arvoille sekä 270 kelvinin maksimikirkkauslämpötilamarginaalia. Nousevilla radoilla NIR-antennilämpötilojen aikajono on niin tasainen, että marginaalien ylityksiä on vähän. 14.62 % kuvista hylättiin RFI:n takia, mutta tunnusluvut pienenevät pudottamatta kaikkien kirkkauslämpötilojen keskiarvoa.

Laskevilla radoilla samalla 0,6 K marginaalilla suoritettu splinimenetelmä kiinteällä marginaalilla poisti yli 2/3 kuvista, mikä viittaa aiemmin todettuun tilanteeseen; laskevilla radoilla RFI:tä on paljon. Tiukasta marginaalista ja suuresta poistoprosentista johtuen menetelmä pienensi RFI-tunnuslukuja menetelmistä eniten. On kuitenkin muistettava, että menetelmää testattiin vain niillä ylilennoilla, joilla RFI:tä oli vähiten. Huonommassa tapauksessa jäljelle ei jäisi enää juurikaan kuvia, eikä muodostettavissa olisi enää minkäänlaisia maankosteuskarttoja.

Spliniä ja mediaanisuodatusta hyödyntävä menetelmä tuotti myöskin haluttua tulosta. Menetelmän hyvänä puolena oli se, että kuvia poistetaan tasapuolisesti aina noin puolet. Tämä toteutui kohtalaisen hyvin; 48.28 % nousevien ja 50.62 % laskevien ratojen kuvista poistettiin ja hyvyyden tunnusluvut paranivat huomattavasti.

Kuten spliniin ja kiinteän marginaaliin perustuva poisto, myös pelkkään mediaanisuodatukseen perustava poisto toimi RFI:n määrään mukautuvasti. 24.15 % nousevien ja 47.42 % laskevien ratojen kuvasta poistettiin, eli enemmän RFI:tä sisältävistä ylilennoista poistettiin enemmän kuvia. Laskevien ratojen poisto-osuudesta on pääteltävissä, että häiriötä on lähes koko ajan Suomen ylilennoilla, sillä puolet kuvista poistettaisiin vain siinä tapauksessa, että NIR-käyrässä ei nähtäisi lainkaan tasaisia ajanjaksoja. Huomattavaa menetelmässä on se, että merialueella sovitettuun emissiomalliin perustuva hyvyysarvo parani ainoastaan laskevilla radoilla. Nousevilla arvo kasvoi, joka viittaisi RFI-tilanteen pahanemiseen testattavalla merialueella.

Myös pikseleitä poistavat menetelmät tekivät muutoksen parempaan suuntaan. Menetelmien tarkoituksena oli huomata, mitkä pikselit ovat RFI:n osalta niin huonossa tilanteessa, että ne kannattaa jättää huomioimatta. Koska tässä testissä on käytetty ainoastaan RFI:n osalta kohtalaisen puhtaita ylilentoja, oli rajat valittu tarkoituksella tiukoiksi. Testi on ajettu poiston jälkeen pelkästään niille pikseleille, jotka poiston jälkeen on jätetty jäljelle.

Taulukko 1: Poistojen tulokset nousevilla radoilla.

	Splini	Mediaani	Splini-mediaani	Keskiha-jontaleikkaus	Maxmin-leikkaus	Kuvien keskihajontaleikkaus
μ_{mean} (219.2 K)	+0.06 %	-0.01 %	-0.08 %	+1.73 %	+1.10 %	-0.27 %
μ_{maxmin} (41.68 K)	-6.14 %	-6.04 %	-11.61 %	-12.53 %	-16.72 %	-17.00 %
μ_{std} (8.507 K)	-3.08 %	-1.71 %	-1.58 %	-15.19 %	-15.80 %	-6.33 %
μ_{max} (241.9 K)	-0.73 %	-0.81 %	-1.40 %	+0.40 %	-0.74 %	-2.08 %
ε_{maa} (65.26 K ²)	-25.68 %	-21.86 %	-22.69 %	-29.09 %	-81.49 %	-49.97 %
$\varepsilon_{\text{meri}}$ (179.8 K ²)	-0.40 %	+1.26 %	-1.53 %	-0.04 %	+0.04 %	-8.82 %
Poistettut kuvat	14.62 %	24.15 %	48.28 %	–	–	41.59 %
Poistettut pikselit	–	–	–	19.80 %	25.69 %	–

Taulukko 2: Poistojen tulokset laskevilla radoilla.

	Splini	Mediaani	Splini-mediaani	Keskiha-jontaleikkaus	Maxmin-leikkaus	Kuvien keskihajontaleikkaus
μ_{mean} (219.6 K)	-1.41 %	-0.52 %	-0.52 %	4.69 %	+3.46 %	-1.30 %
μ_{maxmin} (117.6 K)	-58.31 %	-23.98 %	-24.56 %	-57.96 %	-64.11 %	-66.44 %
μ_{std} (17.21 K)	-34.94 %	-10.85 %	-9.13 %	-48.95 %	-50.79 %	-49.65 %
μ_{max} (275.1 K)	-11.77 %	-4.92 %	-5.05 %	-6.56 %	-8.83 %	-13.45 %
ε_{maa} (2320 K ²)	-95.85 %	-30.94 %	-14.63 %	(-99.36 %)	(-99.36 %)	-98.75 %
$\varepsilon_{\text{meri}}$ (649.6 K ²)	-56.94 %	-28.15 %	-29.02 %	(-95.93 %)	(-96.85 %)	-88.75 %
Poistettut kuvat	69.07 %	47.42 %	50.62 %	–	–	43.40 %
Poistettut pikselit	–	–	–	46.92 %	65.36 %	–

Sekä pikseleiden keskihajontaan perustava leikkaus keskihajontarajalla 11 K etä minimin ja maksimiin perustava leikkaus arvolla 50 K toivat melko samankaltaiset tulokset. Laskevilla radoilla pikseleitä poistettiin noin kaksi kertaa enemmän kuin nousevilla. Vaikka tunnusluvut paranivat suunnilleen yhtä paljon kuin kuvien poistossa, ei näitä menetelmiä voi periaatteessa verrata keskenään, sillä kuvanpoistomenetelmät parantavat jokaisen pikselin arvoa RFI:n vaikutusta kumoten ja pikselinpoistomenetelmät vain hylkäävät pikseleitä pois käytöstä. Maa- ja merialueen emissiomallien sovitukseen liittyvät prosenttiluvut on taulukossa suluissa, sillä osassa testiajoista kaikki testialueiden pikselit joutuivat poistetuiksi ja tällöin malliin sovitettujen kirkkauslämpötilojen keskinelövirhe oli 0.

Luvun 6 epäilyistä huolimatta myös yksittäisten pikselien keskihajontaan perustuva kuvien poisto tuottaa tulosta. Nousevien ratojen pikselien keskimääräinen minimin ja maksimin keskimääräinen erotus sekä laskevien keskimääräinen keskihajonta pieneni vertailluista menetelmistä eniten. Kuvia poistettiin kummallakin lentosuunnalla hieman yli 40 %.

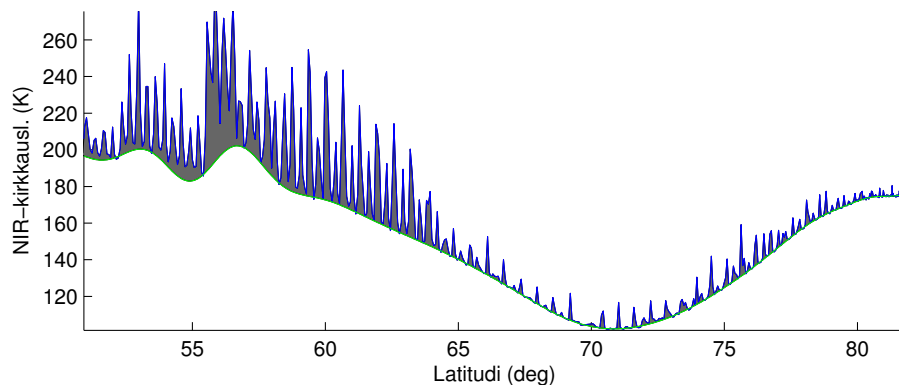
Poistomenetelmiä vertailtaessa voidaan todeta, ettei yksikään menetelmä erottunut selkeästi muista paremmuudellaan. Jokaisessa on omat hyvät ja huonot puolensa ja menetelmien käytön kannattavuus riippuu käyttötarkoituksesta ja häiriöiden toleranssista.

8 Radiotaajuisten häiriöiden määrä Suomen alueella vuosina 2010 ja 2011

Yksittäisten integraatiojaksojen RFI-tunnistuksen ja -poiston lisäksi voidaan tutkia häiriöiden määrää myös pidemmällä aikavälillä. SMOS-satelliitti on tämän diplomityön kirjoittamiseen mennessä kiertänyt maapalloa kolme vuotta ja kerännyt tänä aikana suuren määrän aineistoa. Mittausaineistosta voimme tutkia radiotaajuisten häiriöiden kehityksen. Häiriöt ovat voineet lisääntyä ajan aikana Euroopassa käytössä otettujen uusien radiolähetyslaitteiden vuoksi tai ne ovat voineet vähentyä, mikäli vanhat kielletyllä MIRAS-radiometrijärjestelmän kaistalla säteilevät laitteet on otettu pois käytöstä joko tekniikan vanhenemisen tai SMOS-projektin käynnistämisen radiotaajuisten häiriöiden etsinnän vuoksi.

Koska pitkäaikaisen kehityksen seuraamiseen tarvitaan paljon mittauksia, on järkevää käyttää kevyttä NIR-mittausaineistoa. RFI:n määrän seuraamiseen soveltuu erityisen hyvin alaluvussa 6.1 esitelty splinialgoritmi alaluvussa 6.1.2 esitellyllä painokerroinfunktiolla. Koska splinifunktio edustaa melko hyvää arviota RFI-vapaasta NIR-antennilämpötilasta ja alkuperäisissä antennilämpötila-arvoissa RFI on mukana, saamme näiden erotuksesta arvion RFI:n aiheuttamasta antennilämpötilan kasvusta eli RFI-antennilämpötilasta.

Kuvassa 22 oleva sinisten antennilämpötilojen ja vihreän splinin välissä oleva harmaan alueen korkeus edustaa RFI-antennilämpötilaa. Tässä luvussa RFI:n voimakkuutta on kuvattu RFI-lämpötilan keskiarvona. Suurempi harmaa alue kuvassa tarkoittaa suurempaa keskiarvoa ja voimakkaampaa RFI:tä ylilennolla. Koska pahimmassa tapauksessa NIR-antennilämpötilan arvo mittauksissa saturoituu 297 kelviniin, on splinin maksimi-arvo rajoitettu 250 kelviniin, mikä tarkoittaa RFI-antennilämpötilaksi merkittävän tällöin 47 kelviniä.



Kuva 22: Nousevista Suomen ylilennoista otettu esimerkki NIR-antennilämpötiloista (sininen) ja spliniapproksimaatiosta (vihreä). Harmaa alue edustaa RFI:n voimakkuutta.

Tässä luvussa on tutkittu RFI:n voimakkuutta kahden vuoden aikana Suomen yllä. Vuosien 2010 ja 2011 aikana SMOS-satelliitti on ollut Suomen yllä 526 kertaa nousevilla radoilla ja 541 kertaa laskevilla radoilla. Näiltä ylityksiltä on latitudien

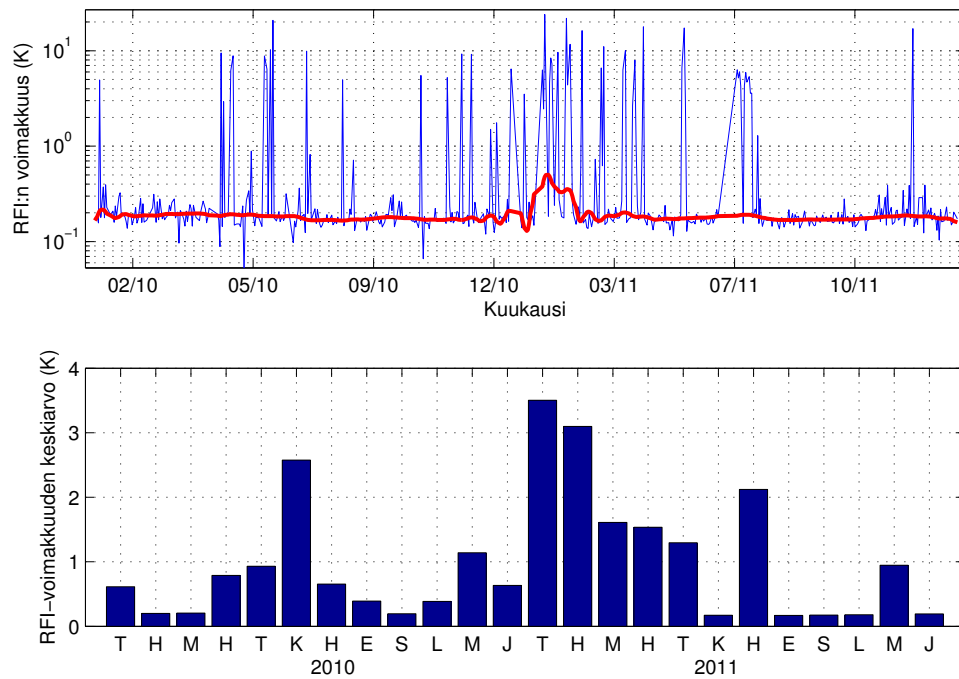
$60^\circ - 70^\circ$ välillä laskettu RFI:n voimakkuus RFI-antennilämpötilojen keskiarvona kahden vuoden ajalta. Tulokset on esitetty kuvissa 23(a) ja 23(b). Kuvien ylemmissä kuvaajissa on kaikki RFI-voimakkuudet sinisellä käyrällä ja alemmissä näiden kuukausittaiset keskiarvot palkkeina. Koska RFI-voimakkuudet vaihtelevat kohina-
maisesti, on ylemmissä kuvissa myös esitetty punaisella tulokset suodatettuna ensin mediaanisuodatuksella ja tämän jälkeen alipäästösuodatuksella. Tällainen suodatus poistaa yksittäiset korkeat piikit ja tasoittaa käyrän käytännöllisempään esitettävään muotoon.

Nousevien ratojen kuvaajasta nähdään, että RFI:n voimakkuuden perustaso on pysynyt kahden vuoden aikana lähes samana. Alipäästösuodatetun mediaanikäyrän perustaso on suuruusluokkaa 0.18 K, eli splini on poikennut kirkkauslämpötiloista keskimäärin tämän verran. NIR-mittauksen epätarkkuudesta johtuva laitteen aiheuttama vaihtelu on tätä luokkaa, mikä tarkoittaa sitä, että häiriöitä ei tällaisilla ylilennoilla ole suomen kohdalla tullut NIR-antenneihin lanikaan. Usein kuitenkin nähdään ylilentoja, joilla voimakkuus on huomattavasti suurempi. Korkeimmat piikit ovat arvoltaan 24 K, mikä tarkoittaa melko vahvaa häiriötä.

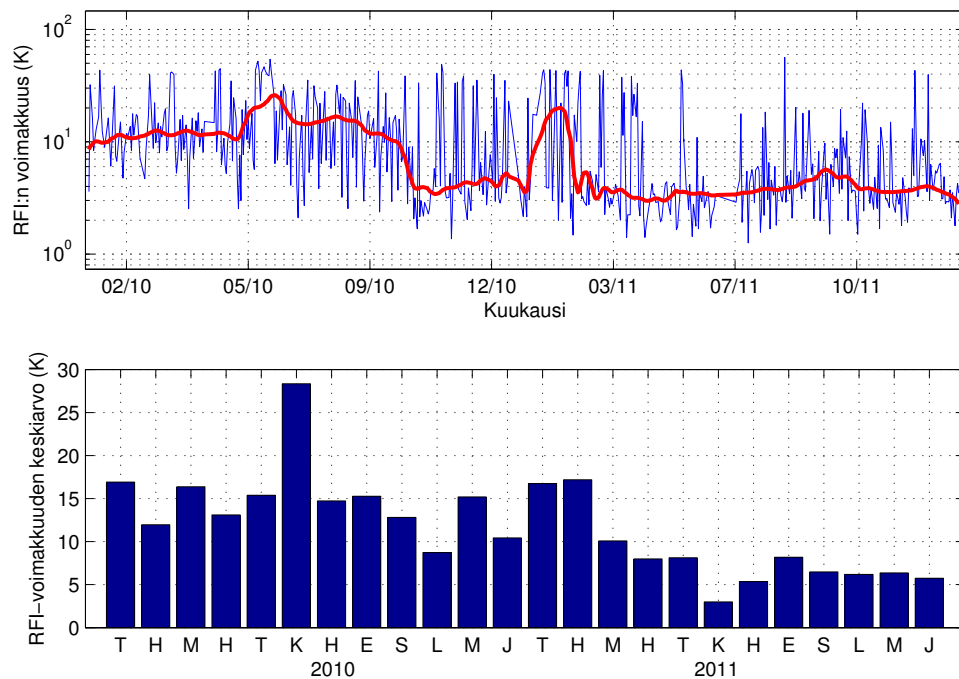
Nousevien ratojen kuvaajasta nähdään myös tavallista voimakkaamman RFI:n jakso vuoden 2011 alussa. Tällöin myös suodatettu mediaaniarvo nousee hieman. Suodatetun mediaanin maksimiarvo on tällöin 0.5 K, joka ei tarkoita kovin vahvaa RFI:tä.

Laskevilla radoilla tilanne on jälleen huonompi. RFI-voimakkuuksien käyrän arvot vaihtelevat 1,2 K ja 56 K välillä. Myös laskevilla radoilla on nähtävissä sama RFI-voimakkuuden kohouma vuoden 2011 alussa. Kohouma on laskevilla radoilla huomattavasti voimakkaampi; RFI-antennilämpötilat nousivat tuona aikana keskimäärin 15 kelviniä. Aiheuttajana on luultavasti sekä nousevilla että laskevilla ylilennoilla sama RFI-lähde.

Suodatetun mediaanin esittämä RFI-voimakkuuden perustaso on vuoden 2010 alkupuolella noin 11 K, mutta lokauussa 2010 se putoaa äkisti noin 3.5 K:iin. Tämä on hyvin todennäköisesti merkki RFI-lähteen sammuttamisesta. Ylilentoja tarkemmin tarkastelemalla huomataan, että ennen tätä ajanhetkeä useimmilla laskevien ratojen ylilennoilla antennilämpötilat kävivät niin voimakkaiksi, että ne saturoitui-
vat NIR-radiometrin maksimirajalle asti. Tämän ajanhetken jälkeen ne sen sijaan jäivät lähes aina kauas maksimiarvosta. SMOS-mittauksiin on siis tällöin tapahtunut huomattava muutos ja häiriöiden vähentyminen, joka todennäköisesti parantaa mittauksia huomattavasti. RFI:n määrä on myös hieman vähentynyt tämän jälkeenkin, mikä voi olla myöskin RFI-lähteiden sammuttamisesta johtuvaa.



(a) Radiotaajuisten häiriöiden määrä Suomen ylllennoilla nousevilla radoilla. Ylemmässä kuvaajassa jokaisen yllennon arvioitu keskimääräinen häiriön antennilämpätila sinisellä sekä punaisella näiden arvojen mediaani-ja alipäästösuodatetut arvot lograitmisessa asteikossa. Alemmassa kuvassa kuukausittaiset keskiarvot.



(b) Kuvaa 23(a) vastaavat tiedot laskevilla radoilta.

Kuva 23: Radiotaajuisten häiriöiden määrä vuosina 2010 ja 2011

9 Yhteenveto

SMOS-satelliitin mittauksia häiritseviä radiotaajuisia häiriöitä on tässä diplomityössä tarkasteltu monella datatasolla ja monilla menetelmillä. RFI-tutkimusta on tälle satelliitille tehty aiemminkin, mutta tämä työ on tähän asti laajin tutkimus Suomen alueella mittauksiin vaikuttavista häiriöistä. Tutkimuksen tuloksista on hyötyä sekä tulevalle RFI:n tutkimukselle että meteorologialle.

Jokaisen tason tutkimuksesta selvisi, että Suomen alueella RFI vaikuttaa nousevilla radoilla laskevia vähemmän, vaikka laskevat radat ovatkin maailmalla yleensä nousevia ratoja paremmassa asemassa RFI:n osalta. Suomen laskevien ratojen häiriöitä aiheuttavat useimmiten horisontissa näkyvät matalalle suunnatut tutkat, jotka aiheuttavat impulssimaisia häiriöitä. Voimakkaimmissa tapauksissa kuvatasossa nähdään häiriöissä kaksiulotteinen impulssivaste, joka ulottuu eteläiseen Suomeen asti. Tämän vuoksi Etelä-Suomessa on Pohjois-Suomea enemmän häiriötä.

Impulssimaisten häiriöiden poistamista varten on tässä työssä kehitetty useita menetelmiä. NIR-radiometrien antennilämpötilojen aikasarja on osoittautunut toimivaksi informaatiolähteeksi näiden impulssien tunnistamiseen ja impulssien ajanhetkellä tuotettujen kuvien poistamiseen.

Häiriöiden tunnistamisessa sopivaksi työkaluksi oli todettu spliniapproksimaatio, joka oikeanlaisella painokerroinfunktion valinnalla kykeni antamaan approksimaation NIR-antennilämpötilasta sillä tasolla, millä se olisi ilman häiriöiden vaikutusta. Splinin avulla pystytään arvioimaan radiotaajuisien häiriöiden voimakkuutta sekä löytämään ne ajanhetket, jossa impulssimaiset häiriöt vaikuttavat.

Työssä on esitetty myös ilman NIR-vastaanottimien antamaa informaatiota toimivia häiriöntunnistusmenetelmiä. Kuvatasosta pystytään poistamaan kokonaisia kuvia tai yksittäisiä pikseleitä tutkimalla kirkkauslämpötilojen tilastollisia ominaisuuksia.

SMOS-satelliitin häiriöntunnistusta vaikeuttaa se ettei satelliitissa ole häiriöiden tunnistamiseen tarkoitettua laitteistoa. MIRAS-radiometrijärjestelmä ei myöskään anna informaatiota taajuuskaistansa spektristä. Spektrin avulla olisi mahdollista tutkia häiriöitä paremmin, sillä yleensä häiriöiden kaista eroaa luonnollisesta maanpinnan säteilyemissiospektristä. Spektrin tutkiminen helpottaisi RFI-tunnistusta.

Tämä tutkimus on myös jättänyt paljon asioita tutkittaviksi. Diplomityössä on esitetty vain joitakin menetelmiä RFI:n tutkimiseen, joten lisätutkimuksiin on vielä tarvetta. RFI:n vaikutuksia valmiisiin L2-tason maanperän kosteutta ja valtamerten suolaisuutta kuvaaviin karttoihin tulee tutkia, sillä todellisia haittavaikutuksia ei näe L1-tasolla.

Myös pienellä kohtauskulmalla kuvannetut kirkkauslämpötilat jättävät pohdinnan varaa. Kun kohtauskulma on maanpinnan suhteen pieni, mittauksesta tulee epätarkkaa, sillä pienillä kohtauskulmilla satelliitin näkemät pienet kulmat projisoituvat suurelle alueelle ja erilaiset maa-alueet emittoivat pienillä kohtauskulmilla eri voimakkuuksilla. Myös useimmat RFI-lähteet ovat näkyvissä vain pienillä kohtauskulmilla. Useat RFI:n vaikutukset vähenisivät, mikäli pienien kohtauskulmien kirkkauslämpötilat jätettäisiin pienemmälle huomiolle maankosteuksia laskettaessa.

Työn ohessa tehdyssä kahden vuoden NIR-mittausten tutkimuksessa selvisi RFI:n

äkillisesti vähentyneen huomattavasti. RFI-lähteiden sammuminen tuo huomattavia parannuksia satelliitin mittaustarkkuuteen. Tulevaisuudessa olisi hyödyllistä selvittää lähteiden tarkat sijainnit, jotta niiden omistajien kanssa voitaisiin neuvotella häirinnän lopettamisesta. RFI-tutkimuksen olisi tästäkin syystä siirryttävä tutkimaan korkeampia mittaustasoja ja käytettävä aikaa yksittäisten ylilentojen tehokkaaseen tarkasteluun. Tämän diplomityön yhteydessä ei tehty selvityksiä siitä, minkä tyyppisiä lähettämiä ja missä maantieteellisissä sijainneissa RFI-lähteet olivat.

Radiotaajuisten häiriöiden tutkimus jatkuu Aalto-yliopistolla tämän diplomityön jälkeenkin. Luvassa on siis lisää tietoisuutta SMOS-satelliittia häiritsevistä signaaleista ja niiden vaikutuksen vähentämisestä.

Viitteet

- [1] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, "Microwave Remote Sensing," *Remote Sensing*, pp. 191 – 205, 1981.
- [2] L. Graham, "Synthetic interferometer radar for topographic mapping," *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, pp. 763 – 768, june 1974.
- [3] I. Corbella, N. Duffo, M. Vall-llossera, A. Camps, and F. Torres, "The visibility function in interferometric aperture synthesis radiometry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, pp. 1677 – 1682, aug. 2004.
- [4] A. Camps, J. Bara, I. Sanahuja, and F. Torres, "The processing of hexagonally sampled signals with standard rectangular techniques: application to 2-D large aperture synthesis interferometric radiometers," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, pp. 183 –190, jan 1997.
- [5] K. McMullan, M. Brown, M. Martin-Neira, W. Rits, S. Ekholm, J. Marti, and J. Lemanczyk, "SMOS: The Payload," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, pp. 594 –605, march 2008.
- [6] Y. Kerr, P. Waldteufel, J.-P. Wigneron, S. Delwart, F. Cabot, J. Boutin, M.-J. Escorihuela, J. Font, N. Reul, C. Gruhier, S. Juglea, M. Drinkwater, A. Hahne, M. Martin-Neira, and S. Mecklenburg, "The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle," *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, pp. 666 –687, may 2010.
- [7] A. Camps, I. Corbella, M. Vall-llossera, N. Duffo, F. Marcos, F. Martinez-Fadrique, and M. Greiner, "The SMOS end-to-end performance simulator: description and scientific applications," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International*, vol. 1, pp. 13 – 15 vol.1, july 2003.
- [8] M. Martin-Neira, S. Ribo, and A. Martin-Polegre, "Polarimetric mode of MIRAS," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, pp. 1755 – 1768, aug 2002.
- [9] A. A. Gutierrez, "SMOS L1 System Concept," *DEIMOS Engenharia*, vol. 2.9, pp. 1 – 47, oct 2010.
- [10] A. Gutierrez, J. Barbosa, N. Almeida, N. Catarino, J. Freitas, M. Ventura, and J. Reis, "SMOS L1 processor prototype: From digital counts to brightness temperatures," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International*, pp. 3626 –3630, july 2007.
- [11] E. Obligis, C. Boone, G. Larnicol, S. Philipps, B. Tranchant, and P.-Y. Le Traon, "Benefits of the Future Sea Surface Salinity Measurements From SMOS: Generation and Characteristics of SMOS Geophysical Products," *IEEE*

Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 46, pp. 746 –753, march 2008.

- [12] G. Jorda and D. Gomis, “Toward SMOS L4 SSS Products: Improving L3 SSS With Auxiliary SSS Data,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, pp. 2204 –2214, may 2010.
- [13] A. Camps, J. Gourrion, J. Tarongi, A. Gutierrez, J. Barbosa, and R. Castro, “RFI Analysis in SMOS Imagery,” in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International*, pp. 2007 –2010, july 2010.
- [14] A. Camps, J. Gourrion, J. M. Tarongi, M. Vall Llossera, A. Gutierrez, J. Barbosa, and R. Castro, “Radio-Frequency Interference Detection and Mitigation Algorithms for Synthetic Aperture Radiometers,” *Algorithms*, vol. 4, no. 3, pp. 155–182, 2011.
- [15] J.-P. Wigneron, J.-C. Calvet, A. Chanzy, O. Grosjean, and L. Laguerre, “A composite discrete-continuous approach to model the microwave emission of vegetation,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, pp. 201 –211, jan 1995.
- [16] E. P. J. B. Dinnat, G. Caudal, and J. Etcheto, “Issues concerning the sea emissivity modeling at L band for retrieving surface salinity,” *Radio Science*, vol. 38, may 2003.
- [17] K. Rautiainen, J. Kainulainen, T. Auer, S. Tauriainen, and M. Hallikainen, “Helsinki University of Technology Synthetic Aperture Radiometer -HUT-2D,” in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International*, pp. 3635 –3638, july 2007.
- [18] E. Anterrieu, “On the Detection and Quantification of RFI in L1a Signals Provided by SMOS,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, pp. 3986 –3992, oct. 2011.

A Testeissä käytetyt ylilennot

Tässä liitteessä on listattu testeissä käytetyt L1c-tason mittausaineistot. Listauksesta on hyötyä tulevalle SMOS-satelliitin tutkimuksille Suomen alueella. Tiedostojen nimet ovat listattuna aikajärjestyksessä ja niistä ilmenee niiden sisältämien mittaus-ten aikaväli.

A.1 Vuoden 2010 nousevat ylilennot

Vuodelta 2010 mukana oli nousevista Suomen ylilennoista käytettävissä 12. Mukana ovat vuoden kaikki säännöllisesti 18 vuorokauden välein tapahtuneet lennot, joissa oli käytöissä täysipolarimetrinen mittaustila. 18 vuorokauden välein satelliitti lentää lähes täsmälleen saman kohdan yli samansuuntaisella radalla. Ylilennot on listattu seuraavassa listassa.

```
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100113T024207_20100113T033606_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100326T023922_20100326T033324_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100501T023755_20100501T033154_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100712T023459_20100712T032858_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100730T023427_20100730T032826_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100817T023347_20100817T032749_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100904T023306_20100904T032705_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100922T023218_20100922T032617_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20101010T023122_20101010T032524_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20101115T023028_20101115T032427_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20101203T022955_20101203T032356_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20101221T022917_20101221T032318_346_001_5
```

A.2 Vuoden 2010 laskevat ylilennot

Laskevia ylilentoja oli mukana 14. Valintakriteeri oli sama kuin nousevissa, eli 18 vuorokauden välein tapahtuneista ylilennoista ne, joissa täysipolarimetrinen tila oli käytössä.

```
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100112T173143_20100112T182542_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100325T172858_20100325T182259_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100412T172816_20100412T182217_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100430T172731_20100430T182130_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100605T172547_20100605T181946_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100623T172503_20100623T181902_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100711T172435_20100711T181834_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100729T172401_20100729T181802_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100816T172323_20100816T181724_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20101009T172058_20101009T181500_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20101027T172028_20101027T181429_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20101114T172006_20101114T181402_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20101202T171930_20101202T181329_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20101220T171852_20101220T181254_346_001_5
```

A.3 Testiin valikoidut nousevat ylilennot

Luvussa 7.4 on käytetty edellisistä ylilennoista viittä nousevalla radalla ja viittä laskevalla. Ylilennot oli valikoitu radiotaajuisten häiriöiden määrän mukaan. Mukana on viisi sellaista ylilentoa, joilla Suomen alueella pikseleiden kirkkauslämpötilojen keskiarvo on matalin. Mukana ovat siis ne ylilennot, joilla on vähiten RFI:tä.

```
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100113T024207_20100113T033606_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100712T023459_20100712T032858_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100922T023218_20100922T032617_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20101010T023122_20101010T032524_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20101221T022917_20101221T032318_346_001_5
```

A.4 Testiin valikoidut laskevat ylilennot

Laskevista ylilennoista on mukana ne viisi, joilla RFI:tä on vähiten.

```
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100412T172816_20100412T182217_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100430T172731_20100430T182130_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20100921T172153_20100921T181552_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20101009T172058_20101009T181500_346_001_5
SM_REPR_MIR_SCLF1C_20101114T172006_20101114T181402_346_001_5
```